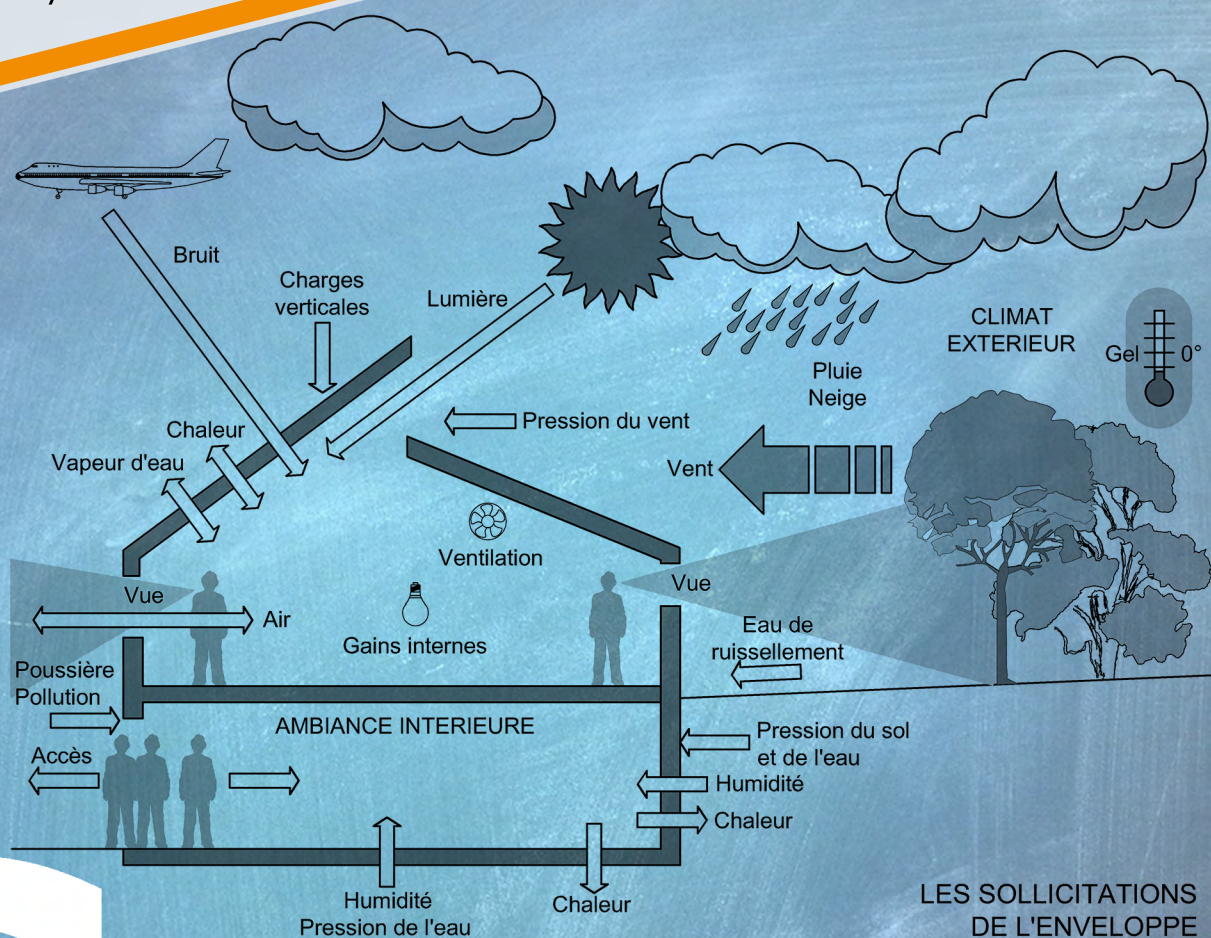


LA CONCEPTION GLOBALE DE L'ENVELOPPE ET L'ÉNERGIE

Jean-Marie Hauglustaine
et Francy Simon



Guide pratique pour les architectes

Ce guide pratique a été élaboré sous la direction de :

- **Jean-Marie HAUGLUSTAINE**, Dr. ir. architecte, chargé de cours au Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège, Directeur de l'Unité de recherche EnergySuD (Energie et Développement durable) ;
- **Francy SIMON**, Ir. architecte, Professeur émérite à l'Université Catholique de Louvain ;

et avec la collaboration de **Françoise BUYSE**, architecte de recherche et **Stéphane MONFILS**, ir. architecte-doctorant, tous deux à l'équipe de recherche EnergySuD.

Il constitue la mise à jour du guide pratique pour architectes *La conception globale de l'enveloppe et l'énergie*, édité en 2001 auquel avaient collaboré Catherine BALTUS et Sophie LIESSE.

PRÉFACE **4**

LES ENJEUX **5**

LES DEUX PRINCIPAUX ENJEUX	5
CONCILIER CES ENJEUX DANS LA CONCEPTION DU BÂTIMENT	7
LE CADRE DE CET OUVRAGE	11
L'IMPORTANCE DE LA PART DE L'UTILISATION DU BÂTIMENT DANS SON BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBAL	12

LES FONCTIONS ET PERFORMANCES DE L'ENVELOPPE **16**

LES PRINCIPALES SOLLICITATIONS DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE	17
LES FONCTIONS À REMPLIR PAR L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE	17

L'ENVELOPPE ET L'HYGROTHERMIE **26**

LES RÔLES DE L'ENVELOPPE EN CE QUI CONCERNE L'HYGROTHERMIE	26
L'ÉTANCHÉITÉ À L'EAU ET À L'AIR	26
LE CONTRÔLE DE LA VENTILATION	30
L'ISOLATION THERMIQUE CONTINUE	34
LE CONTRÔLE DE LA MIGRATION DE VAPEUR AU TRAVERS DE LA PAROI	40
LA PARTICIPATION DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE À L'INERTIE THERMIQUE	42

LES PRINCIPES ET OUTILS DE CONCEPTION **50**

LA FORME GLOBALE DE L'ENVELOPPE	50
LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE	61
LES ÉTAPES DE CONCEPTION	71

LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION **73**

CONCEPTION GÉNÉRALE DES ESPACES CHAUFFÉS ET NON CHAUFFÉS	74
LES PLANCHERS	76
LES FAÇADES VERTICALES	79
LES BAIES ET LES ÉLÉMENTS TRANSLUCIDES	83
LES PROTECTIONS SOLAIRES	86
LES TOITURES INCLINÉES	88
LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	90
LES TOITURES PLATES	93

BIBLIOGRAPHIE **95**

ANNEXES **97**

ANNEXE 1 : APPROCHE QUANTITATIVE	97
ANNEXE 2 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES	98
ANNEXE 3 : GLOSSAIRE	105

TABLE DES MATIÈRES **109**

Depuis quelques années, les préoccupations du monde scientifique quant à l'équilibre climatique de la Terre ont trouvé écho dans la société civile et le monde politique. La population elle-même commence à prendre conscience de la situation. Mais ce n'est pas le seul enjeu auquel nous sommes confrontés.

La sécurité d'approvisionnement, notamment, doit être anticipée dès aujourd'hui : la consommation d'énergie augmente continuellement (elle devrait doubler d'ici 2030), alors que les réserves - en charbon, pétrole, gaz naturel et uranium - s'épuisent inéluctablement.

Face à ces véritables défis, la maîtrise de la demande constitue cependant aussi un élément primordial : pour reprendre une phrase devenue célèbre, la meilleure énergie reste celle que l'on ne consomme pas ! Dans ce dernier domaine, la performance énergétique des bâtiments est un facteur incontournable.

D'autant que la Directive européenne 2002/91/CE du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments entraîne une petite révolution dans le secteur de la construction et, à terme, dans la rénovation des bâtiments. Cette impulsion a encore été renforcée par la Directive 2010/31/UE dite "PEB Recast".

Même si ces Directives nous invitent à raisonner en termes de performance globale, prenant en considération l'ensemble des caractéristiques énergétiques du bâtiment (enveloppe, équipements de chauffage et d'approvisionnement en eau chaude, installations de climatisation, ventilation, emplacement et orientation des bâtiments, systèmes solaires passifs et protection solaire, ventilation naturelle, qualité climatique intérieure...), l'enveloppe du bâtiment reste certainement le premier élément à considérer.

Dès le départ, la réglementation thermique wallonne impose aux nouveaux bâtiments de respecter un niveau d'isolation thermique globale maximal pour l'enveloppe. Depuis 1996, des coefficients de transmission thermique $U_{\max}$ ont été imposés aux parois de déperdition. La tendance, notamment eu égard aux objectifs fixés au niveau européen, est de renforcer les exigences actuelles en la matière.

Ce nouvel ouvrage vient enrichir la collection des "*Guides pratiques pour les Architectes*" mis à jour en explorant, sous l'angle de l'énergie, la méthodologie de conception de l'enveloppe. Il a pour objectif d'intégrer les critères de performance énergétique, dès les premiers stades du projet, afin de réaliser un bâtiment de qualité sans surcoût significatif.

L'énergie n'est qu'un des nombreux paramètres qu'un architecte doit maîtriser et ce n'est peut-être pas votre priorité aujourd'hui. Pourtant, je suis persuadée qu'il faut changer nos habitudes en la matière et que l'architecte est la "Pierre angulaire" des défis que constitue la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment. Celle-ci correspond à un impératif économique, social et environnemental.

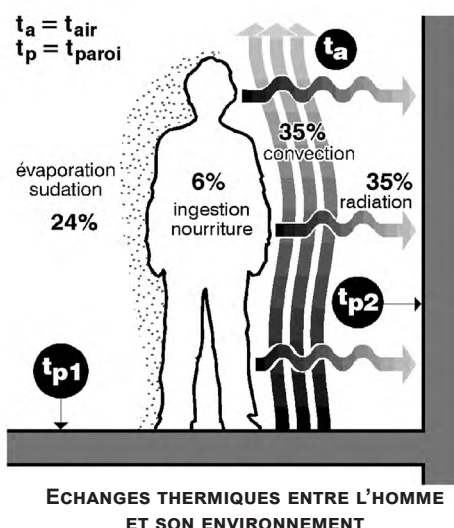
Bonne lecture à tous !

Annick FOURMEAUX,
Directrice générale.

LES ENJEUX

LES DEUX PRINCIPAUX ENJEUX	5
L'HOMME ET LE CONFORT.....	5
<i>Le bilan thermique de l'homme dans son environnement.....</i>	5
<i>La température de confort.....</i>	6
L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉNERGIE.....	6
<i>Le concept de développement durable.....</i>	6
CONCILIER CES ENJEUX DANS LA CONCEPTION DU BÂTIMENT.....	7
L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE (URE) ET L'UTILISATION DURABLE DE L'ÉNERGIE (UDE).....	7
<i>La typologie du bâtiment.....</i>	8
<i>Le bilan énergétique.....</i>	9
<i>L'isolation thermique.....</i>	9
<i>L'adéquation entre le mode d'occupation et le bâtiment.....</i>	10
LE CADRE DE CET OUVRAGE	11
L'IMPORTANCE DE LA PART DE L'UTILISATION DU BÂTIMENT DANS SON BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBAL.....	12
L'ÉMISSION OU LE STOCKAGE DE CO ₂ LORS DE LA CONSTRUCTION.....	12
LA CONSOMMATION GLOBALE D'ÉNERGIE.....	13
LE CYCLE DE VIE.....	14

LES DEUX PRINCIPAUX ENJEUX



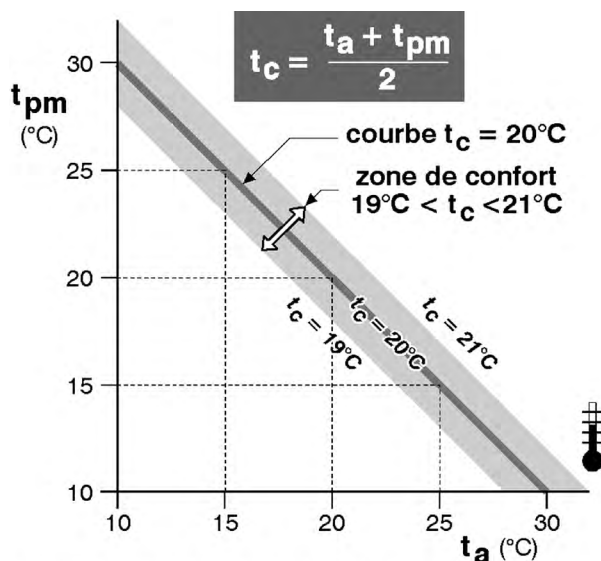
L'HOMME ET LE CONFORT

LE BILAN THERMIQUE DE L'HOMME DANS SON ENVIRONNEMENT

D'une température de 36,6 degrés en général plus élevée que la température ambiante, le corps humain dissipe une certaine quantité de chaleur vers l'environnement qui l'entoure.

L'activité réalisée, la vêtue, la température de l'air ambiant et la température de surface intérieure des parois du local sont autant de facteurs qui interviennent dans le bilan global de confort.

Les échanges thermiques interviennent pour 70 % dans le bilan thermique et se font par rayonnement et convection.



t_{pm} = température moyenne de surface intérieure de parois (°C)
 t_c = température de confort
 t_a = température de l'air (°C)

Pour éviter un échange thermique trop important et donc inconfortable entre le corps et son environnement, il y a lieu d'éviter :

- la radiation du corps vers des parois froides, en réduisant la conduction de la chaleur du local à travers elles, de façon à maintenir leur surface interne à une température de l'ordre de 20°C ;
- la convection autour du corps, en limitant les mouvements d'air rapides au sein du local.

Il faut également noter qu'un petit pourcentage (environ 1%) des échanges thermiques se fait via le contact entre les pieds et le sol.

Dans ce cas, la conductivité thermique du matériau de surface intervient dans la sensation de confort car, pour une température de surface identique, certains matériaux peuvent paraître plus ou moins chauds.

LA TEMPÉRATURE DE CONFORT

Puisque les échanges par convection et rayonnement sont importants dans le bilan thermique, la température moyenne de surface intérieure des parois du local (t_{pm}) et la température de l'air ambiant du local (t_a) sont les facteurs essentiels du confort thermique.

On définit la température de confort t_c comme la moyenne entre la température moyenne de surface intérieure des parois du local t_{pm} et la température de l'air ambiant du local t_a ; c'est-à-dire :

$$t_c = \frac{t_a + t_{pm}}{2}$$

A une température de confort t_c donnée, si t_{pm} est faible, on devra augmenter t_a et donc consommer plus d'énergie (voir figure ci-contre). Un autre facteur de confort est l'homogénéité des températures des parois du local.

Isoler thermiquement une paroi, c'est la rendre moins conductrice de la chaleur et donc augmenter sa résistance thermique. En effet, les températures de part et d'autre de la paroi auront tendance à s'équilibrer et donc, en hiver, à refroidir la paroi ; en isolant cette paroi, le transfert de température est plus lent.

Ceci permet de garder des températures des parois élevées et donc d'épargner l'énergie nécessaire à chauffer l'air ambiant intérieur.

LES ÉNERGIES DISPONIBLES (INSPIRÉ DE [LIEB-09])

Le maintien et le développement des activités humaines sur la Terre reposent sur l'existence d'énergies disponibles en abondance et bon marché. Ces énergies disponibles se partagent en deux groupes, à savoir :

- les énergies renouvelables dites énergies "flux" ;
- les énergies non renouvelables dites énergies fossiles ou énergies "stock".

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Elles englobent toutes les énergies inépuisables qui, depuis toujours, nous viennent du soleil directement sous forme de lumière et de chaleur ou indirectement par les cycles atmosphériques, la photosynthèse et l'énergie éolienne. Le soleil dispense un rayonnement qui constitue notre source lumineuse et thermique.

Les sources d'énergie renouvelable sont présentes partout sur la planète, inégalement réparties selon les sources. Leur disponibilité est intermittente (soleil), aléatoire (vent) ou en concurrence avec d'autres usages ou besoins (eau, biomasse).

Les gammes de puissance s'étendent de la micro-application jusqu'aux centrales de plusieurs MW (parcs éoliens, barrages hydroélectriques, biomasse, centrales solaires...). Outre leur caractère renouvelable, leur intérêt réside aussi dans leur utilisation à l'échelon local (unités décentralisées) et dans leur impact largement positif sur l'environnement.

LES ÉNERGIES NON RENOUVELABLES

Ces sources d'énergie sont elles-mêmes des sous-produits fossiles végétaux ou animaux de l'énergie solaire (charbon, gaz, pétrole, etc.) ou des gisements naturels (uranium).

Elles ont l'avantage d'être facilement utilisables en raison de leur haute densité énergétique. Les sources fossiles ont permis l'avènement des unités industrielles de grande puissance (sidérurgie, verre, chimie...) et sont également à l'origine du transport de masse. Elles ont cependant l'inconvénient d'avoir un impact négatif sur l'environnement (émission de CO_2) et, surtout, d'être limitées.

L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉNERGIE

LE CONCEPT DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

La dégradation du milieu naturel et les modifications climatiques actuelles sont directement liées aux activités de l'homme.

Le maintien et le développement des activités humaines sur notre planète reposent sur l'existence des énergies disponibles mais il est important d'utiliser ces énergies de façon rationnelle et durable.

Apparu il y a une vingtaine d'années, le concept de développement durable donne des pistes de réflexion pour un

LE DÉVELOPPEMENT DURABLE ET LA CONSTRUCTION [CIEFF-03]

La construction durable est un processus qui intègre les trois aspects du développement durable :

- efficacité économique ;
- équité sociale et bien être ;
- préservation de l'environnement.

Le concept de "construction durable" est apparu comme une problématique émergente du secteur de la construction. En effet, durant sa vie, le bâtiment est responsable, en Europe, de :

- 50 % du total des ressources naturelles exploitées ;
- 40 % des déchets produits ;
- 42 % des consommations d'énergie ;
- 30 % des émissions de CO₂ ;
- 16 % des consommations d'eau.

Un bâtiment durable n'est pas un bâtiment qui nécessite de recourir à des équipements et technologies très sophistiqués et chers, c'est au contraire, un bâtiment qui met à profit une architecture de bon sens répondant au milieu local (site, climat, etc.), aux besoins présents et futurs.

« développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins ».

Ce concept repose sur les principes suivants :

- la prise en considération de l'ensemble du cycle de vie des matériaux ;
- le développement de l'utilisation des matières premières et énergies renouvelables ;
- la réduction des quantités de matière et d'énergie utilisées lors de l'extraction des ressources naturelles, de l'exploitation des produits et de la destruction ou du recyclage des déchets.

CONCILIER CES ENJEUX DANS LA CONCEPTION DU BÂTIMENT

L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE (URE) ET L'UTILISATION DURABLE DE L'ÉNERGIE (UDE)

En fonction des aspects économiques et écologiques, la conception des bâtiments et surtout de leur enveloppe ne peut qu'évoluer.

Economiser l'énergie, réduire les dépenses et protéger l'environnement, cela passe par :

- une étude de la typologie du bâtiment ;
- une isolation thermique appropriée ;
- une adéquation entre le mode d'occupation et l'architecture du bâtiment.

L'Utilisation Rationnelle de l'Energie (URE) fait le choix des solutions qui s'accompagnent de la dépense énergétique la plus petite c'est-à-dire [IBGE-10] :

- **Utiliser des équipements énergétiquement efficaces**
En d'autres mots, habiter un bâtiment peu énergivore et utiliser des techniques performantes pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation, les moyens de transport, les appareils électriques et électro-ménagers qui doivent être énergétiquement efficaces.

- **Utiliser des infrastructures énergétiquement efficaces**

Par exemple : un habitat dispersé augmente les besoins en déplacement des habitants tout en rendant inefficace les transports en commun. D'autre part, il augmente les infrastructures et leur frais de fonctionnement.

- **Préférer les matériaux et services ayant un faible contenu énergétique**

La dépense énergétique comprend l'énergie consommée pour le service voulu (se chauffer, se déplacer, mener ses diverses activités), mais également celle contenue dans les objets, matériaux ou services utilisés, ainsi que les dépenses induites pour le futur c'est-à-dire

DÉFINITION

La **compacité volumique** d'un édifice s'exprime comme le rapport du volume protégé V sur la surface totale de déperdition A_T.

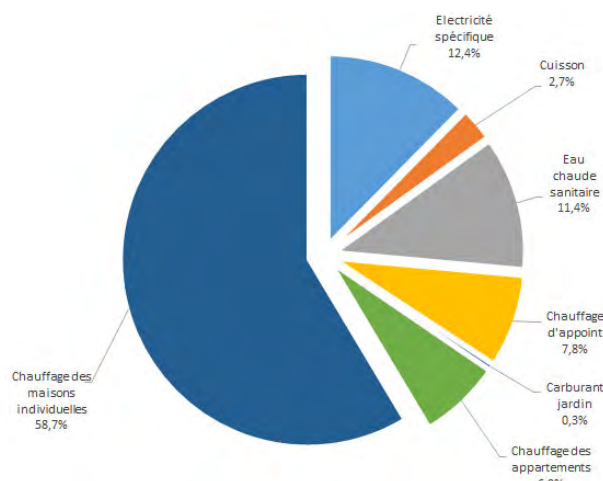
Le **volume protégé V** comprend tous les espaces chauffés directement ou indirectement et qui sont thermiquement isolés de l'ambiance extérieure, du sol ou d'espace voisin non à l'avri du gel.

Exemple : lorsque le grenier est isolé thermiquement mais n'est pas chauffé, il fait partie du volume protégé. Si seul le plancher du grenier est isolé, alors dans ce cas, le grenier ne fait pas partie du volume protégé. Le même raisonnement peut être tenu pour les caves, les volumes de rangement et les garages.

Le volume protégé V est calculé à partir des dimensions extérieures des ouvrages.

Les parois qui séparent le volume protégé de l'ambiance extérieure, du sol ou des espaces voisins ne faisant pas partie du volume protégé, forment l'**enveloppe du bâtiment**. La **superficie de déperdition thermique A_T** est définie comme étant la superficie de l'enveloppe du bâtiment. Il s'agit de l'ensemble des parois par lesquelles le volume protégé V de la maison peut perdre de la chaleur.

Le chapitre "Éléments de composition" détaillera cette notion de compacité.



RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DU SECTEUR RÉSIDENTIEL PAR USAGE PRINCIPAL EN 2014 [SPWE-17]

ESTIMATION DES APPORTS INTERNES

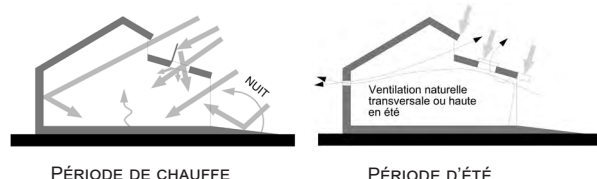
On estime qu'en ce qui concerne les appareils d'éclairage ou tout autre appareil électrique, 70 (ampoules LED) à 95 % de l'énergie électrique utilisée est convertie en chaleur. De plus, un occupant effectuant un travail léger fournit à l'ambiance une quantité d'énergie qui se situe aux alentours de 100 à 120 Watts.

QUANTITÉ D'ÉNERGIE PAR PERSONNE	WATTS
Assis au repos	110
Debout au repos	130
Assis, travail modéré	145
Debout, travail léger	175
Travail modéré	200
Travail actif	230
Travail intense	290
Travail pénible	400

PRINCIPE DES GAINS SOLAIRES

Le principe consiste à stocker, dans les parois lourdes, les apports solaires directs qui passent à travers les vitrages des fenêtres pendant les périodes de chauffe.

- Périodes de chauffe : les apports solaires directs à travers les vitres se stockeront principalement dans les parois lourdes frappées directement par les rayons. La diffusion à travers l'espace est aussi possible mais moins efficace.
- Périodes d'été : il est important de gérer les apports solaires sur les surfaces vitrées au sud (SE à SO) :
 - soit par la prescription d'un vitrage avec un facteur solaire faible ou un vitrage thermochrome ;
 - soit par la végétation ;
 - soit par la forme du bâtiment ;
 - soit par une occultation idéalement extérieure.



l'énergie qui a été consommée tout au long de leur cycle de vie. On parle de l'énergie grise d'un matériau.

• Agir avec sobriété (volet éducation), c'est-à-dire :

- Faire la chasse aux gaspillages, entretenir les biens et supprimer les besoins superflus.
- Réduire les achats/dépenses inutiles et augmenter la durée de vie des produits.

Il est important de répondre à ces 4 critères pour pouvoir satisfaire à une utilisation rationnelle de l'énergie. A savoir que l'utilisation rationnelle de l'énergie nécessite un volet éducation non négligeable car une technique aussi efficace soit elle peut être utilisée à mauvais escient. Un exemple assez simple est par exemple la porte de garage ouverte toute la journée dans un bâtiment très bien isolé.

L'Utilisation Durable d'Énergie (UDE) fait le choix des énergies durables comme vecteur énergétique pour les techniques utilisées.

L'énergie durable est l'énergie capable de répondre aux besoins du moment présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins. Dans les sources d'énergie durable, on classe habituellement toutes les sources d'énergie renouvelable, comme l'hydroélectricité, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie des vagues (plus exactement, celle de la houle), l'énergie géothermique, l'énergie issue de la biomasse ou encore l'énergie marémotrice. Il est également d'usage d'y inclure les technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique (comme par exemple la pompe à chaleur ou la cogénération).

LA TYPOLOGIE DU BÂTIMENT

C'est notamment à travers une "typologie" de bâtiment que l'on peut diminuer cette consommation d'énergie.

En effet, si l'on compare deux bâtiments de volume identique (V), mais de surface totale de déperdition (A_T) différente, on constate que les quantités d'isolant et d'énergie nécessaires au confort thermique dépendent de la compacité volumique de l'édifice, c'est à dire du rapport du volume sur la surface totale de déperdition (V/A_T).

Ainsi, pour un même volume V , les quantités d'isolant et d'énergie nécessaires au confort thermique d'un appartement sont largement inférieures aux quantités d'énergie nécessaires pour obtenir le même confort pour une maison découpée et moins compacte.

Générée dès la première esquisse, la compacité volumique d'un édifice se révèle donc être un facteur signifiant tant dans la conception architecturale que dans l'utilisation durable de l'énergie (UDE).

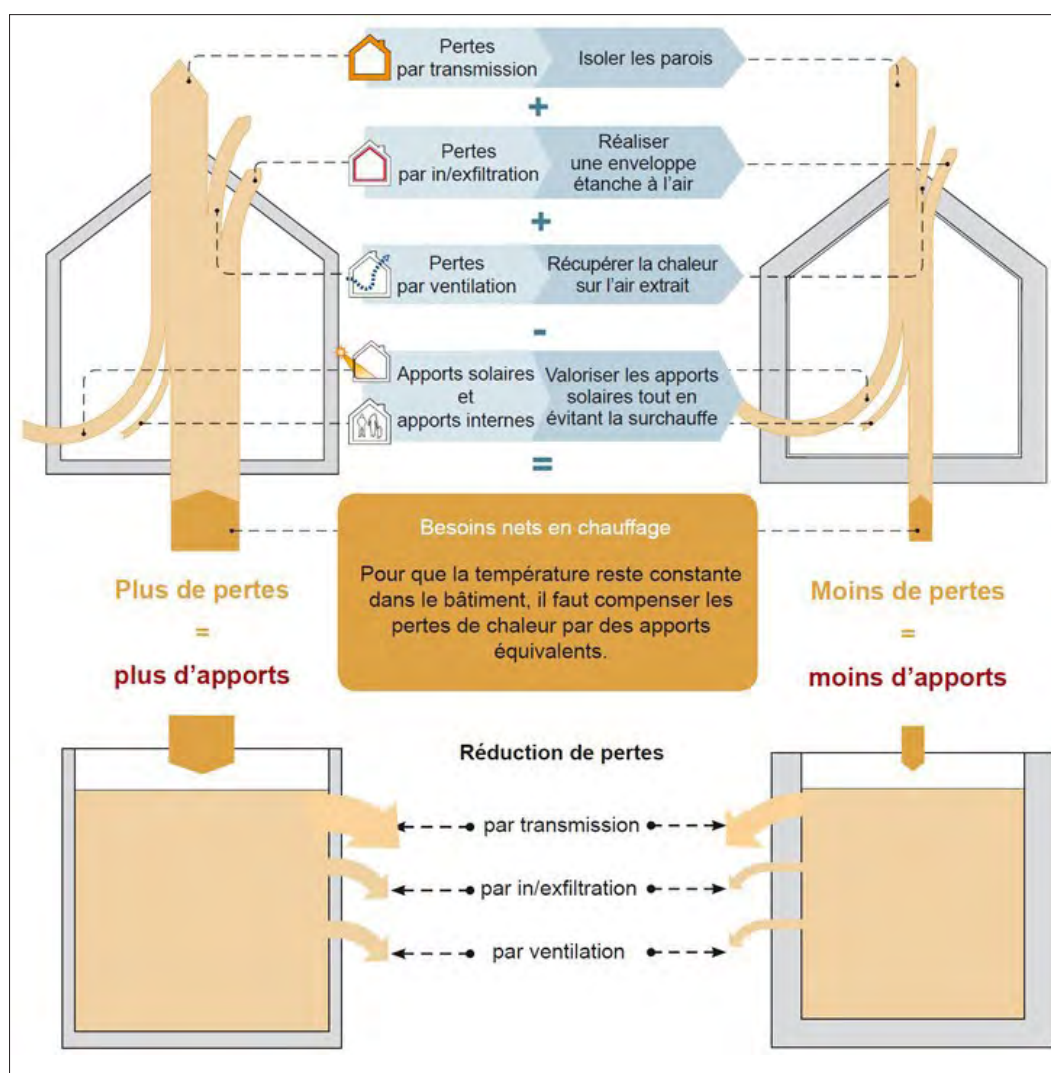
Plus le rapport de compacité volumique est grand, moins les espaces intérieurs seront en contact avec l'extérieur ; les déperditions de chaleur seront donc moindres par unité de volume d'espaces intérieurs.

Les surfaces en contact avec les milieux extérieurs devront présenter des performances correspondant aux critères du développement durable.

Ces performances sont liées non seulement aux matériaux utilisés mais aussi aux détails architectoniques que l'auteur de projet met en place.

LE BILAN ÉNERGÉTIQUE

Le bilan énergétique du bâtiment va se traduire en besoins nets de chauffage, qui résulte du bilan des pertes et des apports d'énergie. Le graphique ci-dessous en constitue une illustration.



BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN BÂTIMENT, RÉSULTANT DES PERTES ET DES APPORTS D'ÉNERGIE [GUIL-15]

POUR MÉMOIRE

L'isolation thermique est liée à la compacité : plus un bâtiment est compact, moins il y a des pertes d'énergie (dans le bilan global). Proportionnellement, dans ce bilan global, les pertes par ventilation prennent une part de plus en plus importante, d'autant plus que l'enveloppe est de mieux en mieux isolée.

Une approche quantitative et relative de ces évolutions est reprise dans le Guide Pratique pour Architectes "La ventilation et l'énergie" [HAUG-17-3] en page 9.

L'ISOLATION THERMIQUE

L'accroissement de la résistance thermique d'une paroi, due à l'apport d'une isolation thermique :

- freine le passage de la chaleur ;
- maintient la surface intérieure des parois à une température suffisamment élevée pour atteindre la température de confort, sans devoir chauffer exagérément l'air ambiant.

Ceci induit une réduction des dépenses d'énergie de chauffage (qui représente près de 80 % de la consommation d'énergie d'un ménage).

Cette diminution de consommation a un rôle immédiat sur

l'environnement, vu que l'utilisation des combustibles fossiles libère des quantités de CO_2 .

L'ADÉQUATION ENTRE LE MODE D'OCCUPATION ET LE BÂTIMENT

Cet objectif est de rechercher une adéquation entre :

- les apports et pertes en terme d'énergie et le bâtiment au travers de sa typologie, de sa construction et de ses matériaux ainsi que le climat et l'environnement dans lequel il s'implante ;
- le mode d'occupation et les occupants.

• Les apports en énergie

Ils se composent de tous les apports de chaleur dus à l'occupation, l'utilisation et l'équipement des locaux (ce sont les apports internes) et de tous les apports de chaleur dus à l'ensoleillement (ce sont les gains extérieurs).

- Les apports internes

Ce sont tous les apports de chaleur fournis par le système de chauffage lui-même, par les équipements mais aussi les apports de chaleur dégagés par une personne en fonction de son activité.

- Les apports extérieurs

Le rayonnement solaire (direct et diffus) réchauffe les parties opaques de l'enveloppe qui, par conduction, diffusent cette chaleur à l'intérieur du bâtiment.

C'est par effet de serre au travers des parois vitrées et translucides que les gains sont les plus importants.

• Les pertes d'énergie

Elles sont constituées des pertes par transmission au travers des parois, des pertes par ventilation et des pertes par in- et exfiltration.

- Les pertes par transmission

Ce sont toutes les pertes de chaleur au travers des parois. La quantité de pertes est liée à la qualité de l'isolation thermique et à la compacité du bâtiment.

- Les pertes par ventilation

Ce sont les pertes inévitables nécessaires pour renouveler l'air dans un bâtiment et ce, pour assurer la qualité intérieure de l'air.

- Les pertes par in- et exfiltration

Ce sont toutes les pertes dues à un manque d'étanchéité à l'air des différentes parois du volume protégé (principalement constaté aux jonctions entre les différents éléments composant l'enveloppe).

• Le contrôle des apports en énergie

- Le contrôle des apports solaires

Le contrôle des apports solaires est indispensable, car le rayonnement solaire peut produire des surchauffes qu'une régulation usuelle maîtrise mal.

Pour économiser de l'énergie, il est conseillé de rechercher l'effet de serre aux périodes froides de l'année.

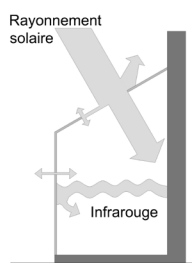
Par contre, dans certains cas, cet effet de serre peut engendrer une hausse des coûts liés aux systèmes de

LES RADIATIONS SOLAIRES

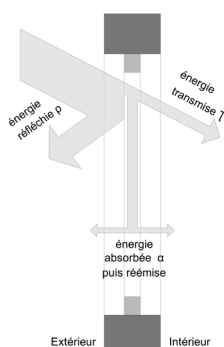
Lorsque le rayonnement solaire frappe un bâtiment, il peut atteindre une paroi opaque ou une paroi translucide (et/ou transparente).

Si le rayonnement atteint :

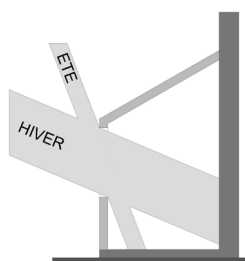
- une paroi opaque : une partie de l'énergie rayonnée est absorbée tandis que le reste est réfléchi ; l'énergie absorbée est réémise en partie vers l'extérieur tandis que l'autre partie se diffuse progressivement vers l'intérieur ;



- une paroi translucide : cette paroi transmettra les rayonnements à courtes longueurs d'onde (rayonnements solaires) vers l'intérieur (τ). Elle réfléchira directement une partie de l'énergie (ρ) (grandes longueurs d'onde) et elle absorbera puis réémettra une très faible partie de l'énergie (α) ;



- l'inclinaison du rayonnement solaire en hiver diffère de celui en été ; en hiver, le rayonnement solaire pénètre plus profondément dans le bâtiment. L'ombrage d'une même fenêtre n'est donc pas le même en hiver qu'en été, il est fonction de la position du soleil et des protections solaires éventuelles.



PRINCIPE DE L'EFFET DE SERRE [DEHE-92]

Le rayonnement solaire, dont les longueurs d'onde sont courtes, traverse le vitrage, en partie.

Il atteint l'intérieur du local et en réchauffe les objets et les parois.

Etant donné que le rayonnement réémis a de grandes longueurs d'onde et que les objets et matériaux translucides des parois extérieures sont "pratiquement opaques" à ces longueurs d'onde, il s'ensuit une augmentation de la température du local.

Ce phénomène, basé sur la captation de l'énergie solaire à travers les parois translucides, est appelé l'effet de serre.

conditionnement d'air, notamment lorsque le taux d'occupation est élevé et que de nombreux appareils électriques (ordinateurs, éclairage artificiel, appareils électroménagers, etc...) sont utilisés.

• Le mode d'occupation et les occupants

La gestion de l'énergie et la notion de confort reposent également par la relation première entre l'homme et son environnement. Le concepteur devra donc introduire la notion d'occupation et du rythme de vie :

- L'occupation ponctuelle du bâtiment
Il faudra privilégier des matériaux qui pourront se réchauffer rapidement et qui seront "chauds au toucher" comme le bois, le tapis (voir, dans l'annexe 3, la notion d'effusivité thermique).
- L'occupation permanente du bâtiment
Il faudra privilégier la gestion du solaire passif et une construction avec une certaine inertie, c'est-à-dire dont les parois seront capables d'accumuler de la chaleur en période de chauffe (en hiver) et de la retransmettre avec un certain déphasage. Cette inertie permet de maintenir une température plus constante dans le bâtiment tout au long de la période de chauffe. A l'inverse, en été, lors de longues périodes de surchauffe, l'inertie pourrait s'opposer au refroidissement rapide du bâtiment et pourrait engendrer des périodes d'inconfort.

LE CADRE DE CET OUVRAGE

Dans le cadre de ces considérations, la Région wallonne est consciente de l'importance de l'intervention des concepteurs sur la consommation d'énergie des bâtiments et sur la qualité de vie dans les espaces bâtis.

Il leur revient d'intégrer, dès les stades initiaux du processus de conception architecturale, les concepts assurant des performances énergétiques compatibles avec les exigences actuelles.

Pour les y aider ce guide se veut une approche globale et de synthèse pour favoriser une conception d'enveloppe en symbiose avec différents éléments tels que :

- la composition architecturale ;
- la conception architectonique ;
- la conception hygrothermique du bâtiment ;
- l'Utilisation Durable de l'Energie (UDE).

Il fait référence à diverses occasions aux autres guides pratiques pour architectes qui le complètent et qui s'inscrivent également dans le concept du développement durable :

- *L'isolation thermique des murs* [HAUG-17-1] ;
- *L'isolation thermique des toitures* [HAUG-17-2] ;
- *La ventilation et l'énergie* [HAUG-17-3] ;
- *La fenêtre et la gestion de l'énergie* [HAUG-17-4] ;
- *La rénovation et l'énergie* [HAUG-17-5].

L'IMPORTANCE DE LA PART DE L'UTILISATION DU BÂTIMENT DANS SON BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBAL

L'ÉMISSION OU LE STOCKAGE DE CO₂ LORS DE LA CONSTRUCTION

Choix constructifs	tonnes CO ₂
Parement et murs en briques	43
Parement en briques et murs en blocs de béton mi-lourd	40
Parement en briques et murs en blocs d'argile expansée	37
Parement en pierres et murs en blocs de béton mi-lourd	35
Parement en briques et murs en blocs de béton cellulaire	27
Parement en briques et façades à ossature bois	24
Bardage en bois, façades et parois intérieures à ossature bois	19

**ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE
(RAMENÉES EN TONNES DE CO₂ ÉQUIVALENT)
POUR LA CONSTRUCTION D'UNE MAISON DE 200 M²
[HAUG-09]**

COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES DE RÉSISTANCE THERMIQUE DE QUELQUES ISOLANTS, DE L'ÉNERGIE NÉCESSAIRE À LEUR FABRICATION ET DE LA QUANTITÉ DE CO₂ ÉQUIVALENT ÉMIS EN COURS DE FABRICATION [D'APRÈS WWW.INIES.FR]

Les 3 dernières lignes du tableau ramènent énergie et émissions de CO₂ au prorata d'une résistance thermique d'1 m²K/W.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES	CG	PUR	EPS	XPS	MW roche	MW verre	MW verre sans formaldéhyde	Ballot de paille	Cellulose
Lambda fréquemment rencontré [W/mK]	0,042	0,024	0,034	0,036	0,035	0,032	0,037	0,052	0,050
Épaisseur [m]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,37	0,25
Résistance [m ² K/W]	2,4	4,25	2,9	2,8	2,85	3,1	2,70	7,10	5,00
Quantité [m ²]	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Durée de vie [an]	100	50	50	50	50	50	50	50	50
Perte [%]	3	5	5	1	2	0	2	0	0,2
Énergie primaire totale [MJ]	247	395	267,5	348,5	182	49,7	53,5	499	115
Énergie non renouvelable [MJ]	165	379	266	345,5	171	39,95	45,2	7,87	27,1
Changement climatique [kg CO ₂ eq]	12,6	15,5	9,85	15,55	12	1,68	2,1	-9,63	1,04
Vérifié	oui	non	non	non	oui	oui	oui	non	non
Chiffres rapportés à R = 1 m²K/W									
Énergie primaire totale [MJ]	106,00	97,59	96,85	125,71	65,14	16,03	20,19	70,28	23,05
Énergie non renouvelable [MJ]	70,81	93,64	96,31	124,63	61,20	12,89	17,06	1,11	5,43
Changement climatique [kg CO ₂ eq]	5,41	3,83	3,57	5,61	4,29	0,54	0,79	-1,36	0,21

Il est possible de s'intéresser au bilan carbone du bâtiment dans sa phase de construction, à savoir la quantité de gaz à effet de serre, ramenés en équivalents CO₂, émise pour la fabrication et la mise en oeuvre des matériaux.

Ce bilan dépend de trois facteurs :

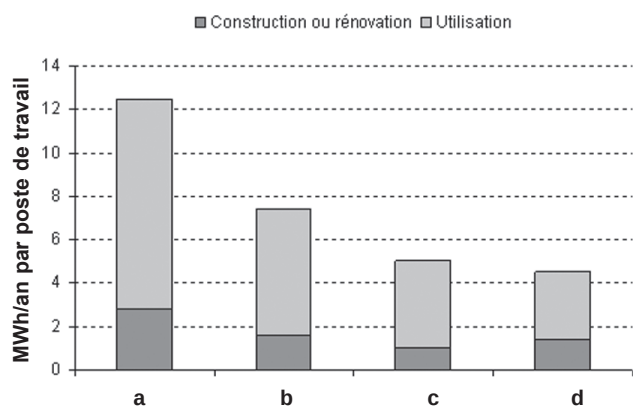
- les types de matériaux ;
- leur performance et leur mode d'acheminement ;
- les procédés mis en oeuvre pour la construction du bâtiment.

Cet exercice peut ainsi se réaliser en comparant les choix constructifs entre eux.

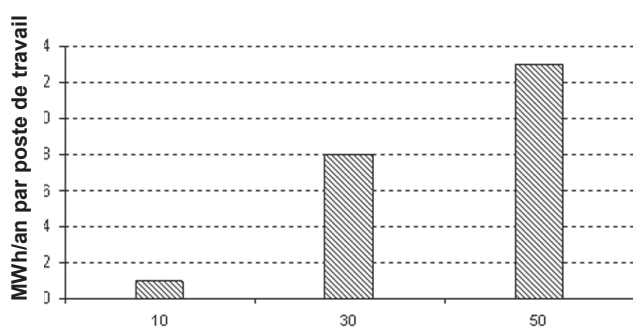
Le tableau ci-contre [HAUG-09] établit le bilan d'émission de gaz à effet de serre (ramenés en tonnes de CO₂) pour la construction d'une maison d'habitation de 200 m² sans caves, selon les choix constructifs courants.

Privilégier l'utilisation de matériaux d'origine végétale (par exemple, en optant pour des parois extérieures à ossature bois) permet de réduire l'émission de gaz à effet de serre vers l'atmosphère. D'autre part, la quantité de matériaux isolants utilisés dans la construction devenant de plus en plus importante, il est dès lors important de réaliser le même exercice de comparaison sur ceux-ci (voir tableau ci-dessous, établi suivant les données INIES).

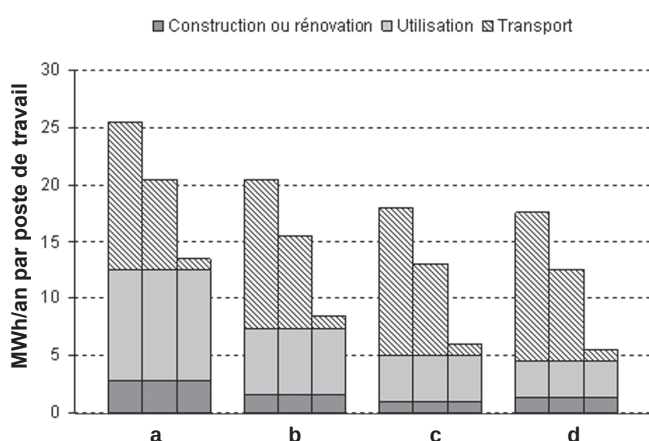
	BÂTIMENT	RENDEMENT SYSTÈMES
a	neuf	moyen
b	neuf	élevé
c	existant réaménagé	élevé
d	neuf	très élevé



1. CONSOMMATION ÉNERGIE PRIMAIRE DES BÂTIMENTS (CONSTRUCTION OU RÉPARATION + UTILISATION)



2. CONSOMMATION DE TRANSPORT SELON LA DISTANCE BÂTIMENT - DOMICILE USAGERS [KM]



3. TOTAL CONSOMMATION BÂTIMENT + TRANSPORT DES USAGERS

À la lumière de ces graphiques, on comprend pourquoi les pouvoirs publics, par le biais des réglementations, continuent à s'intéresser d'abord à la consommation d'énergie d'usage, puis à la consommation pour le déplacement des usagers, avant de considérer l'énergie grise pour la construction, la rénovation et la démolition des bâtiments.

LA CONSOMMATION GLOBALE D'ÉNERGIE

L'approche de la consommation d'énergie d'un bâtiment pourrait englober la consommation d'énergie primaire consommée pour l'ensemble de son cycle de vie (sa construction, son utilisation...) mais aussi pour le transport des usagers du bâtiment que sa localisation induit [KOHL-98].

Les graphiques ci-contre (données selon N. KOLHER [KOHL-98]) récapitulent ces modes de consommation dans le cas de quatre bâtiments de bureaux (l'un existant : le c ; les autres neufs : a, b, d), de caractéristiques d'enveloppe comparables (en compacité et isolation thermique).

Ils se différencient par leur niveau de performance des systèmes de ventilation, chauffage, refroidissement et éclairage. Les bâtiments fortement équipés ont des faux-planchers et des faux-plafonds, et disposent d'un équipement de conditionnement d'air généralisé.

Le premier graphique (ci-contre) donne l'énergie primaire nécessaire au projet de construction (ou rénovation) et à l'utilisation du bâtiment, ramenée en MWh/an par poste de travail de 20 m² et postulant une durée de vie du bâtiment de 100 ans.

Ce graphique confirme que l'énergie primaire utilisée pour la construction des bâtiments s'échelonne entre 20 et 30 % du total, tandis que l'énergie consommée pendant l'utilisation des bâtiments varie entre 70 et 80 % de ce même total, déplacement exclus.

Dans les quatre bâtiments, l'énergie primaire consommée pour l'utilisation du bâtiment est largement plus importante que celle nécessaire à sa construction (ou rénovation).

Le second graphique indique la consommation d'énergie primaire nécessaire aux déplacements de leurs occupants, lorsque leur domicile est éloigné de 10, 30 ou 50 km du bâtiment.

Lorsqu'on additionne la consommation induite par le déplacement, aux autres consommations, on obtient les résultats suivants (troisième graphique) : dans les quatre bâtiments simulés, l'énergie primaire consommée pour l'utilisation du bâtiment et pour le déplacement des occupants sont, dans tous les cas, les deux postes les plus importants du total.

Le choix de l'implantation d'un bâtiment est donc aussi un choix fort en matière d'énergie, surtout dans le chef des bâtiments tertiaires.

Il n'est donc pas étonnant que, parmi les réglementations thermiques actuellement en vigueur dans les pays industrialisés, il n'y en ait encore aucune qui impose le respect d'un critère relatif à l'énergie nécessaire à la construction, à la rénovation, puis à la démolition des bâtiments, communément appelée "énergie grise".

LE CYCLE DE VIE

LES INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- **Épuisement des ressources abiotiques (non renouvelables)** [-] : l'indicateur d'épuisement des ressources est calculé en divisant les quantités de matières premières utilisées par leur réserve mondiale respective.
- **Consommation d'énergie primaire [MJ]** : l'énergie consommée sur le cycle de vie des bâtiments est comptabilisée en termes d'énergie primaire, de manière à pouvoir prendre en compte différents types d'énergie distribuée (électricité, chaleur) sur une base homogène. Par exemple, la production d'un kWh électrique nécessite l'extraction d'une certaine quantité d'uranium, de pétrole, de gaz et la mise à disposition de l'énergie hydraulique. Ces différentes quantités sont ensuite traduites en énergie primaire (MJ), unité unique permettant d'additionner les différentes contributions sur une base homogène.
- **Consommation d'eau [litres]** : un autre indicateur concernant l'utilisation des ressources est lié à l'eau, dont les réserves sont limitées dans certaines régions
- **Acidification de l'air [kg SO₂ eq]** : augmentation de la quantité de substances acides dans la basse atmosphère, à l'origine de « pluies acides », du dépérissement de certains écosystèmes forestiers et écosystèmes d'eau douce. L'unité retenue pour évaluer la contribution d'une substance à l'acidification est le potentiel de libération de protons (H⁺).
- **Eutrophisation des eaux [kg PO₄ eq]** : introduction de nutriments, notamment sous la forme de composés azotés et phosphatés, qui conduit à la prolifération d'algues. Ce phénomène peut conduire à la mort de la faune et de la flore des milieux aquatiques. L'unité retenue pour évaluer l'eutrophisation est le kg d'équivalent phosphate (PO₄).
- **Réchauffement global ou effet de serre** : augmentation de la température moyenne de l'atmosphère induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances d'origine anthropique (CO₂, CH₄, CFC, etc.). L'indicateur retenu pour évaluer l'impact potentiel sur l'effet de serre d'une substance est le GPW (Global Warning Power), exprimé en kg d'équivalent CO₂. L'indice GPW mesure le pouvoir de réchauffement de chaque gaz à effet de serre, qui est de 1 pour le CO₂, de 21 pour le CH₄, de 310 pour le N₂O, de 23.900 pour le SF₆ et varie selon les gaz fluorés.
- **Déchets non radioactifs (inertes) [kg]** : l'indicateur de déchets dépend du type de déchets et du coût de traitement. Or, les impacts correspondant à certains procédés de traitement des déchets ne sont pas encore bien connus. C'est pourquoi l'indicateur est défini comme la somme des quantités des divers types de déchets multipliés par les facteurs d'équivalence. Ainsi, un kg de déchets industriels spéciaux correspond à 21 kg de déchets inertes.
- **Déchets radioactifs indirectement générés [dm³]** : l'indicateur de déchets radioactifs est calculé par addition des quantités des différents types de déchets. La catégorie déchet radioactif dépend de son activité et de sa durée de vie. Les déchets de catégorie A sont de faible ou moyenne activité et sont destinés à être stockés pour une durée de l'ordre de 30 ans. Les déchets de catégorie B sont également d'activité moyenne ou faible, mais contiennent des éléments à très longue période comme les déchets de catégorie C, qui eux, sont à très haute activité. Les déchets de type B et C doivent rester confinés pendant des milliers d'années.
- **Odeurs** : évaluées en [m³] d'air pollué.
- **Toxicité (écotoxicité)** : l'European Union System for the Evaluation of Substances (EUSES) est une méthode de caractérisation du risque toxique pour l'homme (et du risque écotoxique pour les écosystèmes) des émissions atmosphériques, des rejets liquides et des substances dispersées dans les sols. La

La prise en compte de l'environnement a été traditionnellement déclinée soit par impact environnemental (déchets, pollutions, consommation d'énergie, etc.), soit par secteur d'activités (industries, transports, etc.), approches qui se sont souvent révélées trop parcellaires pour justifier du bien-fondé environnemental des efforts à réaliser. La diminution de tel ou tel impact modifiait les autres caractéristiques des systèmes considérés, sans que l'on puisse évaluer la pertinence globale de ces modifications.

Au début des années 90, est apparue la nécessité de mettre en œuvre des approches multicritères (consommation de matières et d'énergies, émissions dans l'air et dans l'eau, déchets), prenant en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits, de leur fabrication à leur élimination finale en passant par leur phase d'utilisation : les écobilans.

Le développement de la normalisation internationale (famille des normes ISO 14040) a fixé des bases méthodologiques et déontologiques et retenu le terme « **Analyse de cycle de vie** » (ACV) en lieu et place de « écobilan ».

L'analyse de cycle de vie peut être utilisée au sein de démarches de développement durable, notamment celles orientées sur les produits. Néanmoins, ce type d'analyse ne traite que de la dimension environnementale (voire dans certains cas, économique) et non de l'axe social du développement durable.

En pratique, les **flux de matières et d'énergies entrants et sortants** à chaque étape du cycle de vie sont inventoriés puis on procède à une évaluation des impacts environnementaux à partir de ces données grâce à des coefficients préétablis permettant de calculer la contribution de chaque flux aux divers impacts environnementaux étudiés. En fonction de l'objet de l'étude, les impacts couramment retenus sont l'effet de serre, l'acidification, l'épuisement des ressources naturelles, l'eutrophisation, etc. (voir encadré ci-contre).

Généralement, on retient également la somme de certains flux issue de l'inventaire : la quantité d'énergie, la quantité de déchets, etc.

La complexité des phénomènes en jeu et de leurs interactions est source d'incertitude sur la valeur réelle des impacts sur l'environnement. C'est à ce titre que le qualificatif « potentiel » est utilisé et on parle donc « **d'impacts potentiels** ».

Pour exprimer les résultats de l'analyse et comparer le comparable, on définit l'**unité fonctionnelle**. C'est l'élément de mesure qui permet de quantifier la fonction remplie par le produit étudié.

Dans certains cas bien déterminés, on peut décider de démarrer l'analyse à une étape donnée, ou encore analyser deux procédés différents de fabrication d'un même produit. L'essentiel reste de toujours raisonner à service rendu identique.

Ainsi, pour évaluer les performances environnementales

nature réelle et l'ampleur du dommage subi ne sont pas quantifiées. Ce risque est évalué sur une échelle normée en ayant pris comme substance de référence le para-dichlorobenzène. Les résultats expriment donc un risque équivalent à l'émission d'un gramme de cette substance choisie comme référence [g $C_6H_4Cl_2$ eq].

- **Pollution de l'air par l'ozone photochimique (smog)** [kg C_2H_4 eq] : pollution qui résulte principalement de réactions chimiques entre les oxydes d'azotes et les composés organiques volatils (COV) sous l'effet de la lumière solaire. Elle se traduit par des niveaux élevés d'ozone et d'autres espèces chimiques toxiques pour l'homme et les végétaux. L'unité retenue pour évaluer la pollution photochimique est le kg d'équivalent éthylène (C_2H_4).

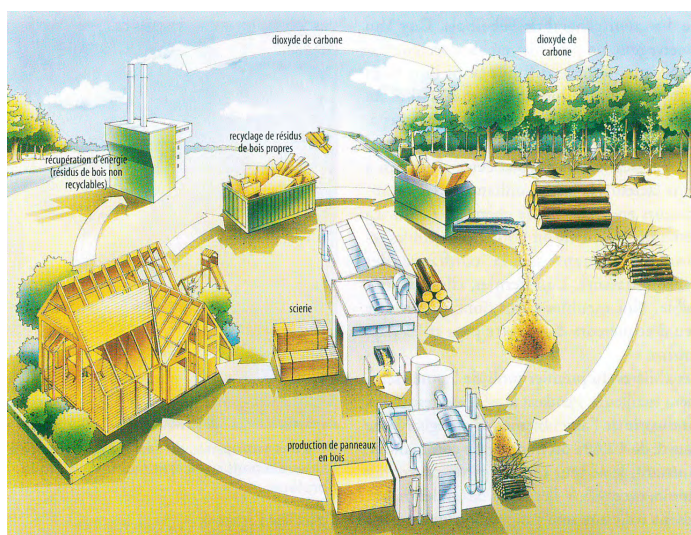
de deux procédés de traitement des déchets, on partira d'une situation initiale commune (une tonne de déchets à traiter) et on ne s'intéressera qu'aux différentes étapes du procédé de traitement (cycle de vie des consommables inclus). On estimera que la tonne de déchets à traiter est identique dans les différents scénarios et n'est donc pas un facteur différenciant entre procédés, c'est-à-dire que les impacts liés à la production et à l'utilisation des produits avant qu'ils ne deviennent des déchets n'entrent pas dans le champ de l'étude.

L'évaluation de l'impact environnemental d'un bâtiment s'établit en le modélisant sur l'ensemble de son cycle de vie : la construction (y compris la fabrication et l'acheminement des matériaux), l'utilisation, le renouvellement des composants et la déconstruction, en tenant compte de la réutilisation et du recyclage éventuel. Elle comptabilise les substances émises et puisées dans l'environnement sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

C'est précisément la démarche poursuivie par un référentiel de performance environnementale d'un bâtiment, ou de bâtiment durable, comme la Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM), le Leadership in Energy and Environment Design (LEED), la Haute Qualité Environnementale (HQE), etc. : le référentiel répertorie une série de critères portant sur l'impact environnemental, mais aussi sur la gestion du projet, la mobilité, l'environnement humain, le confort, le bien-être, la santé..., attribue à chaque critère un poids relatif, et en conclut une cotation globale de qualité environnementale ou de soutenabilité.



LE CYCLE DE VIE DU VERRE, DESSIN ISSU D'UN POSTER PÉDAGOGIQUE ÉDITÉ PAR LA FÉDÉRATION DE L'INDUSTRIE DU VERRE (WWW.VGI-FIV.BE)



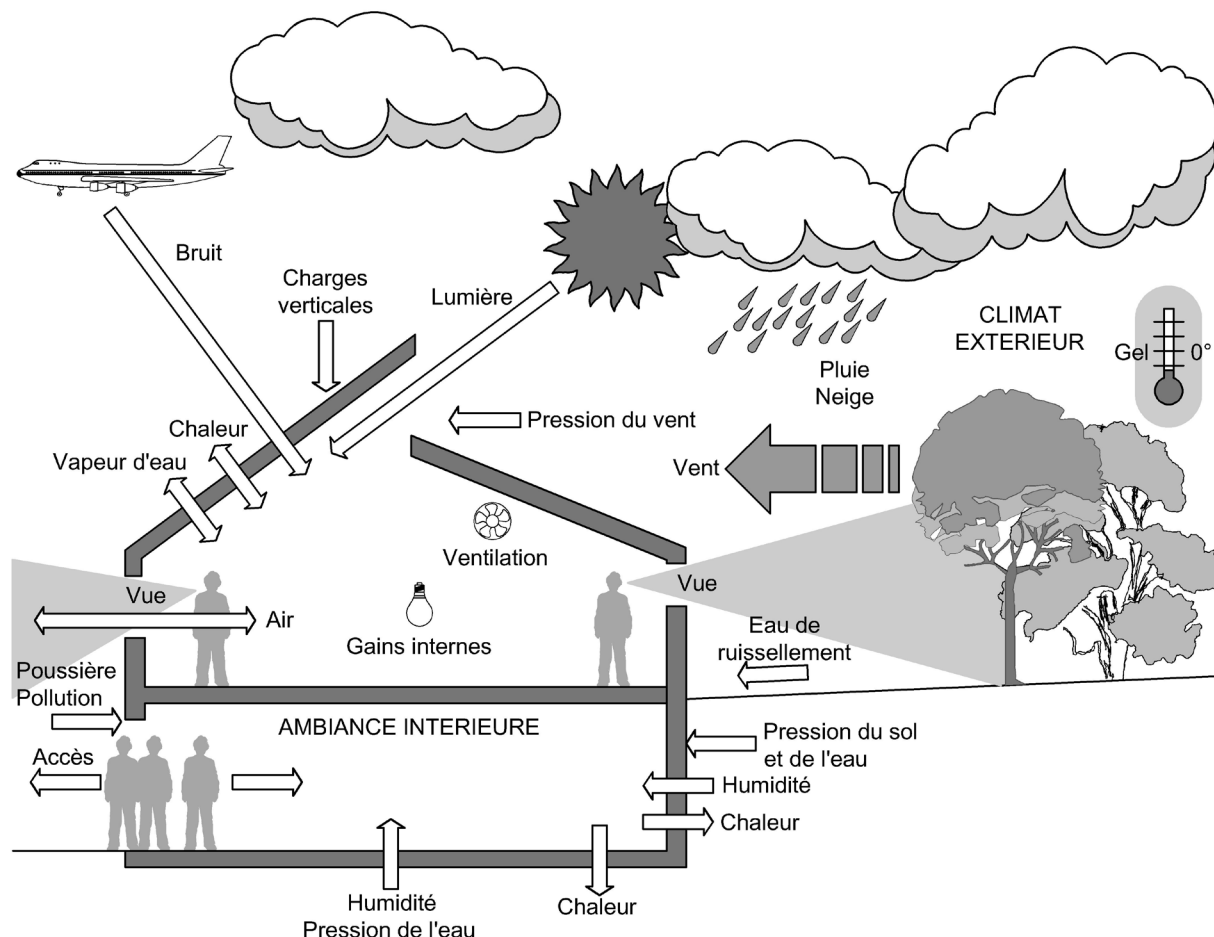
LE CYCLE DE VIE DU BOIS (SOURCE : FEBELBOIS, DANS [VAN -04])

LES FONCTIONS ET PERFORMANCES DE L'ENVELOPPE

LES PRINCIPALES SOLLICITATIONS DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE	17
LES FONCTIONS À REMPLIR PAR L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE.....	17
LE CONTRÔLE DU CLIMAT LOCAL PAR L'ARCHITECTURE	18
<i>L'eau sous toutes ses formes.</i>	<i>18</i>
<i>L'air.</i>	<i>20</i>
<i>La chaleur.</i>	<i>20</i>
<i>Le rayonnement solaire.</i>	<i>22</i>
LE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT	22
<i>Le bruit.</i>	<i>22</i>
<i>La lumière et les vues.</i>	<i>23</i>
LES AUTRES FONCTIONS.....	24
<i>Le contrôle des accès.</i>	<i>24</i>
<i>Le contrôle des effractions.</i>	<i>24</i>
<i>La résistance et la réaction au feu.</i>	<i>24</i>
<i>La fonction structurale.</i>	<i>24</i>
<i>La fonction visuelle et «d'aspect».....</i>	<i>24</i>

LES PRINCIPALES SOLLICITATIONS DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE

L'enveloppe extérieure subit de nombreuses agressions du climat local et de l'environnement [SIMO-95].



LES FONCTIONS À REMPLIR PAR L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE

L'enveloppe extérieure doit pouvoir répondre aux sollicitations climatiques et environnementales précédemment énoncées. Pour ce faire, l'enveloppe, son architecture et tous ses constituants doivent :

- contrôler le climat local, c'est-à-dire :
 - l'eau sous toutes ses formes, l'air et le vent ;
 - la chaleur ;
 - le rayonnement solaire ;
 - les variations de température ;
- contrôler l'environnement, c'est-à-dire :
 - les bruits aériens extérieurs ;
 - la lumière et les vues en général ;
- remplir éventuellement d'autres fonctions telles que :
 - le contrôle des points sensibles tels que les accès ;
 - la maîtrise des agressions diverses, notamment le feu, les effractions, ;
 - la résistance aux charges (fonction structurale) ;
 - la fonction visuelle et "d'aspect".

LE CONTRÔLE DU CLIMAT LOCAL PAR L'ARCHITECTURE

Le climat local peut influencer l'implantation du bâtiment et son architecture.

Réciproquement, l'enveloppe doit enclore un espace qu'elle protège des variations du climat extérieur.

Le climat local doit conditionner l'orientation, la typologie et le dimensionnement des ouvertures et des fenêtres, ainsi que l'utilisation éventuelle de protections.

La sévérité du climat local, ainsi que l'isolation thermique des parois de l'enveloppe et le système de ventilation influencent les besoins en énergie pour chauffer et/ou refroidir l'air introduit dans un bâtiment.

De plus, la disposition des locaux et les matériaux intérieurs jouent un rôle considérable dans l'absorption, le stockage et la distribution de l'énergie apportée par l'ensoleillement (flux solaire transmis au travers des vitrages).

L'enveloppe agit comme une barrière pour certains éléments et comme un filtre pour d'autres.

Les enveloppes protégées étant de plus en plus étanches à l'air, la qualité de l'air intérieur devient également un point important à gérer dans l'acte de bâtir. Il faudra assurer une ventilation correcte et contrôlée du bâtiment mais également veiller à la qualité des matériaux utilisés lors de la construction afin d'éviter de concentrer des composés organiques volatiles (COV) néfastes pour la santé à l'intérieur de l'enveloppe protégée.

L'EAU SOUS TOUTES SES FORMES

• L'eau (sous forme liquide)

L'eau doit être arrêtée totalement par l'enveloppe, c'est-à-dire par tous ses constituants, leurs formes et tous leurs joints, quelle que soit l'action du vent.

• La neige et la glace

Sous nos latitudes, l'enveloppe des bâtiments est moyennement confrontée aux risques que pourraient présenter la neige et le gel. Ce sont chez nous, les cycles de gel et de dégel qui sont les plus à craindre.

Cependant, en plus de la nécessité de tenir compte d'une surcharge lors du calcul de la structure portante, il faut veiller à prendre certaines précautions, notamment en choisissant des matériaux non gélifs pour constituer les parois en contact avec l'extérieur. En effet l'eau infiltrée dans la paroi pourrait, si elle gèle, occasionner certains dégâts.

• La vapeur d'eau

En conditions hivernales, la température et l'humidité de l'air sont plus élevées dans le bâtiment qu'à l'extérieur, surtout dans les locaux qualifiés "d'humides", comme la cuisine, la salle de bains, etc.

L'intérieur du bâtiment est un réservoir de chaleur et de vapeur d'eau qui tendent à s'échapper au travers des parois extérieures. Il faut donc veiller à ce que le transfert vers l'extérieur de l'excédant d'humidité intérieure se fasse correctement sans que cette vapeur d'eau ne s'accumule soit à la surface intérieure ou au sein d'un

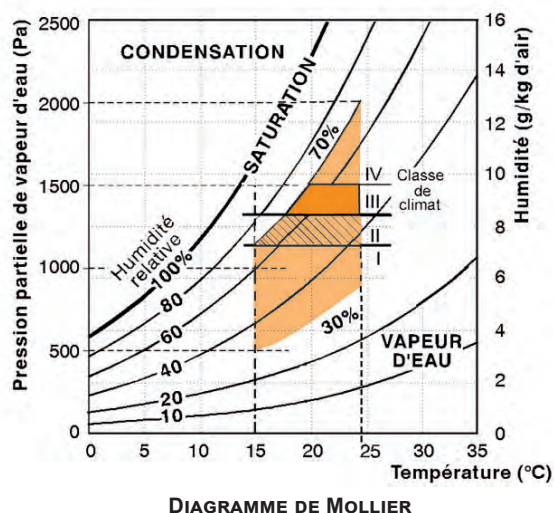
CONDITIONS POUR QU'IL Y AIT CONDENSATION

Le risque de condensation, soit à la surface, soit au sein d'un matériau de l'enveloppe est grand si, simultanément :

- la température des parois est basse ;
- le degré d'humidité de l'air intérieur est élevé.

Remarque : la composition de l'enveloppe doit être telle qu'en aucun endroit, on n'y rencontre des conditions de basse température qui, alliées à une forte teneur en vapeur d'eau, pourraient occasionner des dégradations aux matériaux, suite à des condensations de longue durée.

LES FONCTIONS ET PERFORMANCES DE L'ENVELOPPE



CLASSE DE CLIMAT INTÉRIEUR	EXEMPLES	PRESSIONS DE VAPEUR ANNUELLES MOYENNES À L'INTÉRIEUR p_i (Pa)	DIFFÉRENCES DE PRESSION DE VAPEUR MOYENNES PENDANT 4 SEMAINES $p_i - p_e$ (Pa) (*)
CC I Bâtiments à production d'humidité permanente faible à nulle	entrepôts de marchandises sèches, églises, salles d'exposition, garages, ateliers	$1.100 \leq p_i < 1.165$	$< 159 - 10 \cdot \theta_e$ (**)
CC II Bâtiments bien ventilés avec une production d'humidité limitée par m^3	- habitations ventilées selon la norme - écoles - magasins - bureaux non climatisés - salles de sport et halls polyvalents	$1.165 \leq p_i < 1.370$	$< 436 - 22 \cdot \theta_e$
CC III Bâtiments avec production d'humidité plus importante au m^3 et ventilation modérée à suffisante	(petits) logements, flats habitations non ventilées selon la norme - hôpitaux, homes - salles de consommation, restaurants, salles des fêtes, théâtres - bâtiments faiblement climatisés (H.R. $\leq 60\%$)	$1.370 \leq p_i < 1.500$	$< 713 - 22 \cdot \theta_e$
CC IV Bâtiments à production d'humidité élevée	- bâtiments fortement climatisés (HR $> 60\%$) - locaux d'hydrothérapie - piscines (couvertes) - locaux industriels humides comme par ex. blanchisseries, imprimeries, brasseries, usines à papier	$p_i \geq 1.500$, limitées à 3.000 Pa dans le cadre de la NIT 215	$> 713 - 22 \cdot \theta_e$

Remarque : les bâtiments en surpression, les bâtiments à teneur en humidité fortement fluctuante (p.ex. les dancings) ou les toitures à faux plafond isolé exigent une étude spécifique du point de vue de la physique du bâtiment.

(*) correspond à la figure ci-contre
 (**) θ_e = température extérieure

LES CLASSES DE CLIMAT INTÉRIEUR [CSTC-00]

matériau de l'enveloppe.

La technique et les détails de construction, complétés par le système de ventilation du bâtiment, doivent donc être pensés dans ce sens.

En effet, si la composition de l'enveloppe est telle qu'en un endroit on y rencontre des conditions de basse température et une forte teneur en vapeur d'eau, il y a risque de condensation et donc de dégradation et/ou de développement possible de moisissures, et ce, surtout si la condensation est de longue durée.

Nous verrons dans le chapitre "l'enveloppe extérieure et l'hygrothermie", comment gérer l'étanchéité à la vapeur d'eau et le transfert de celle-ci au travers des parois.

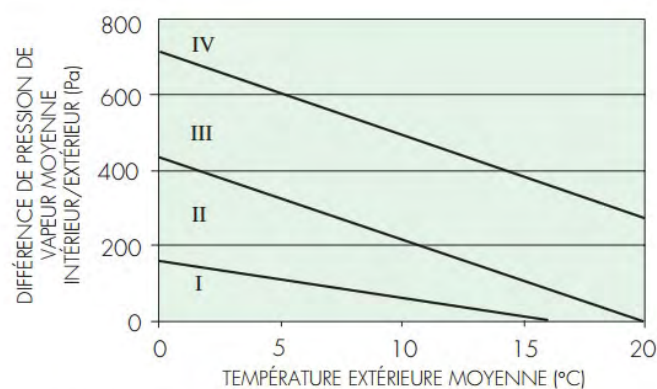
• L'humidité relative

Dans des conditions habituelles de confort (zone grisée sur le diagramme de Mollier ci-contre), le taux courant d'humidité relative de l'air ambiant est préféré autour de 50 %, pour des températures d'air avoisinant 20°C.

Une température élevée de l'air le rend capable de contenir potentiellement plus de vapeur d'eau que d'autres espaces du bâtiment ; c'est le cas pour des locaux tels que la salle de bains ou de douche, la cuisine.

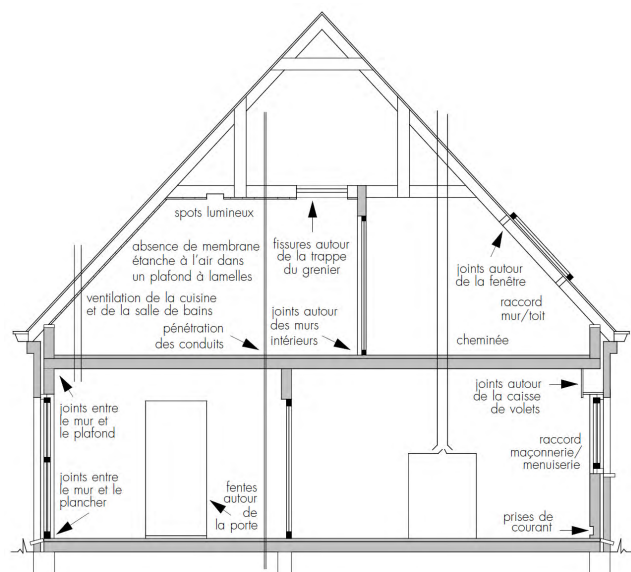
Lorsque cette vapeur d'eau rencontre une paroi froide ou un pont thermique, des problèmes d'hygroscopicité peuvent survenir et entraîner l'apparition de moisissures. En matière d'humidité relative, il faut veiller à évacuer l'humidité produite. En effet, la production de vapeur d'eau doit rester un pic ; la ventilation doit permettre le retour rapide à la normale : **une légère ventilation permanente reste préférable à une ventilation intense mais de courte durée.**

Le tableau ci-contre reprend le classement du climat intérieur du point de vue hygrothermique des bâtiments en fonction de la pression de vapeur de l'air intérieur, en se basant sur la pression annuelle moyenne p_i de la vapeur du climat intérieur (exprimée en pascals Pa).



LIMITES DES CLASSES DE CLIMAT INTÉRIEUR EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE ET DE LA DIFFÉRENCE DE PRESSION DE VAPEUR ENTRE INTÉRIEUR ET EXTÉRIEUR MESURÉE PENDANT UNE PÉRIODE DE 4 SEMAINES [CSTC-00]

LES FONCTIONS ET PERFORMANCES DE L'ENVELOPPE



LES DÉFAUTS D'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DES BÂTIMENTS ET SOURCES DE COURANTS D'AIR [CSTC-94]

REMARQUE : LES MOUVEMENTS DE L'AIR AMBIANT

Il y a lieu d'être attentif aux flux d'air qui résulteraient de la ventilation, des convections engendrées par le système de chauffage et de la disposition des locaux. Il faut contrôler les flux d'air et éviter les courants d'air à des moments non opportuns.

LES TROIS MODES DE PROPAGATION DE LA CHALEUR

Conduction

Mode de propagation de la chaleur à travers un corps ou entre deux corps en contact direct.

La quantité de chaleur qui va se propager par conduction en un temps donné, est :

- directement proportionnelle à la conductivité thermique des matériaux λ [W/mK] constituant la paroi et à la différence de température entre les deux faces ;
- inversement proportionnelle à l'épaisseur e [m] des lames constituant la paroi.

Convection

Transfert de chaleur de la surface d'un corps solide à un milieu gazeux et inversement.

L'intensité de l'échange dépend de la différence de température entre la paroi et l'air, de la vitesse de l'air et des caractéristiques géométriques des parois.

Par exemple, un vent froid et violent causera un important refroidissement.

Rayonnement ou radiation

Transfert de chaleur à travers le vide, du gaz ou de l'air.

Un corps chaud émet un rayonnement infrarouge qui se propage à travers le vide, un gaz ou un corps transparent aux infrarouges. La composition spectrale de ce rayonnement dépend de la nature et de la température de la surface du corps émetteur.

La quantité de chaleur qu'un corps peut transmettre par radiation est fonction de l'émissivité et de la température de surface du corps récepteur.

L'AIR

Vis-à-vis de l'air, l'enveloppe agit plus comme un régulateur que comme une barrière.

Afin de limiter les déperditions thermiques, l'enveloppe extérieure d'un bâtiment ne doit pas présenter de défauts d'étanchéité à l'air.

Ces défauts peuvent notamment survenir :

- au niveau des joints entre mur et toiture ;
- au niveau des joints entre mur et châssis ;
- au niveau des portes ;
- par l'absence de pare-air ;
- par l'absence de finition ou de plafonnage ;
- etc.

Le croquis ci-contre illustre les principaux défauts d'étanchéité et de passage d'air que l'on risque de rencontrer dans toute construction. Il est donc important de concevoir une enveloppe la plus étanche possible à l'air mais, pour des raisons d'hygiène et de confort, il est nécessaire de renouveler périodiquement l'air ambiant intérieur.

La ventilation intensive (par ouverture des portes et des fenêtres) ne permet d'évacuer que ponctuellement des odeurs désagréables exceptionnelles et temporaires ou la surchauffe thermique temporaire. Il est important de doter l'enveloppe d'un système de ventilation permanente qui soit efficace.

La ventilation d'un bâtiment peut être gérée par une installation de ventilation libre ou mécanique [HAUG-17-3].

SYSTÈMES DE VENTILATION SELON LA NORME NBN D50-001 [IBN -91]	PROCÉDÉS DE VENTILATION	
	AMENÉE D'AIR	ÉVACUATION D'AIR
A	naturelle	naturelle
B	mécanique	libre (1)
C	libre (2)	mécanique
D	mécanique	mécanique

- (1) On ne parle pas d'évacuation naturelle, puisque le système comprend un ou plusieurs ventilateurs ; cependant, il s'agit des mêmes ouvertures que les ouvertures pour l'évacuation naturelle.
- (2) On ne parle pas d'alimentation naturelle, puisque le système comprend un ou plusieurs ventilateurs ; cependant, il s'agit des mêmes ouvertures que les ouvertures pour l'alimentation naturelle.

LA CHALEUR

• L'isolation thermique

L'enveloppe extérieure doit limiter les pertes de chaleur en hiver et protéger de la radiation solaire en été.

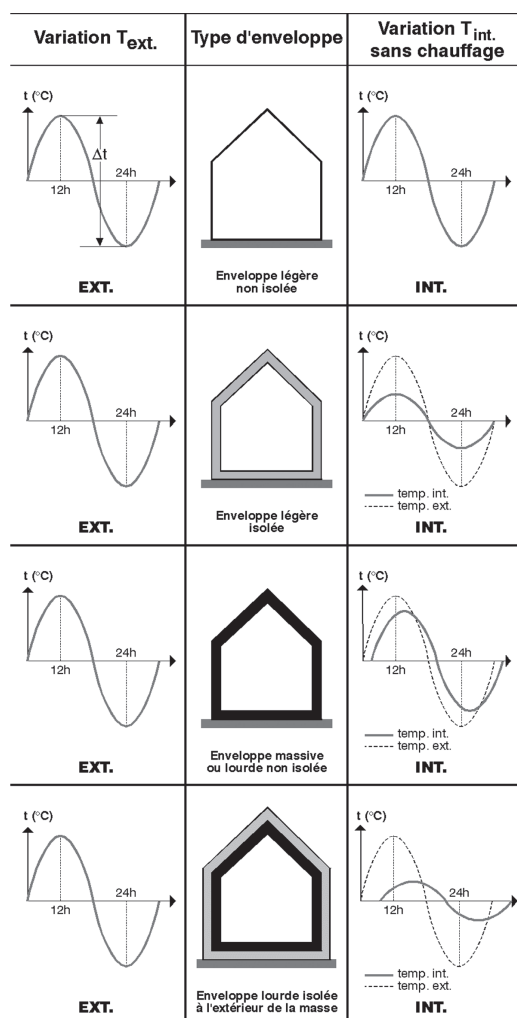
Cette propriété d'atténuation dépend des caractéristiques de transmission thermique des parois par conduction, convection et radiation.

Isoler thermiquement est nécessaire dans les parois verticales, horizontales ou inclinées, qui sont soumises aux conditions climatiques extérieures ou qui sont en contact avec une ambiance "froide" (vide ventilé, espaces "froids" comme un garage, etc.).

LA CAPACITÉ THERMIQUE

Elle est définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température d'un mètre cube de matériau. Elle est le produit de la chaleur spécifique C [J/kgK] du matériau et de sa densité (ρ en [kg/m³]).

COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE ENVELOPPE OPAQUE SANS CHAUFFAGE (SANS ENSOLEILLEMENT)



• La position de l'isolation thermique dans la paroi

Du point de vue des strictes performances de résistance thermique, la position de la couche isolante dans la paroi n'a pas d'importance, pour autant que cette couche soit au sec.

Mais si l'on veut tenir compte des performances souhaitées en termes d'inertie thermique, d'effusivité thermique des surfaces intérieures des parois extérieures et de la problématique des ponts thermiques, la position de cette couche isolante n'est plus anodine.

Pour un bâtiment, les quatre solutions possibles sont :

- isolation par l'extérieur ;
- isolation répartie ou entre deux parois ;
- isolation par l'intérieur ;
- isolation mixte suivant les parois.

• L'inertie thermique

- Le principe

L'inertie thermique d'une paroi ou d'un habitat dans son ensemble a pour effet un déphasage entre l'accumulation de chaleur et sa redistribution en surface des parois et sur la température de l'air intérieur.

Cette propriété est, avec l'isolation thermique, un facteur de confort et d'économie d'énergie. En effet, un fort volant d'inertie conduit :

- en hiver, à un fonctionnement régulier de l'installation de chauffage. Ce qui permet une puissance installée moindre et des variations de la température intérieure plus lentes et plus réduites, donc plus acceptables ;
- en saison d'été, à une température intérieure clémente en soirée et fraîche pendant la journée.

- Le comportement thermique d'une enveloppe opaque sans chauffage

Les graphiques ci-contre donnent successivement le comportement thermique d'une enveloppe opaque sans chauffage (et sans ensoleillement) en fonction de la manière dont le bâtiment est isolé.

On constate dans les cas extrêmes que la température intérieure est directement influencée par les variations de température extérieure.

Par contre, une enveloppe lourde et isolée par l'extérieur a pour effet un déphasage prononcé et l'ambiance bénéficie d'une très faible variation de température intérieure.

REMARQUE

Le confort thermique des maisons anciennes aux murs très épais en matériaux peu isolants, provenait d'un compromis entre une isolation thermique médiocre et une grande inertie thermique, allié à une occupation constante et à un chauffage continu.

LE RAYONNEMENT SOLAIRE

• Les apports solaires et leur stockage

Le rayonnement solaire au travers des parois translucides constitue, par effet de serre (voir annexe 3), un apport de chaleur important.

La possibilité de stockage de cette chaleur dans les parois lourdes peut également avoir une incidence sur les choix des matériaux des parties intérieures de l'enveloppe.

La conception de l'enveloppe doit également tenir compte des variations des dimensions des matériaux dues aux variations de la température extérieure mais aussi dues au gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur.

• La température de surface interne des parois

La température de surface interne des parois extérieures est également importante et sera conditionnée par le choix du type de paroi et les types de matériaux.

Pour obtenir une sensation de confort, il y a intérêt à maintenir une température moyenne de surface intérieure des parois d'un local proche des 18°C (voir p. 5). De plus, le choix des matériaux de revêtement ne diffusant pas vite la chaleur lors d'un contact avec le corps a un impact certain sur cette même sensation de confort. Le cas des revêtements de sol est très représentatif de cette notion de "confort au toucher".

LE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT

LE BRUIT

Le bruit est un ensemble de sons.

Chacun des bruits (souvent parasites) est caractérisé par un niveau et une tonalité.

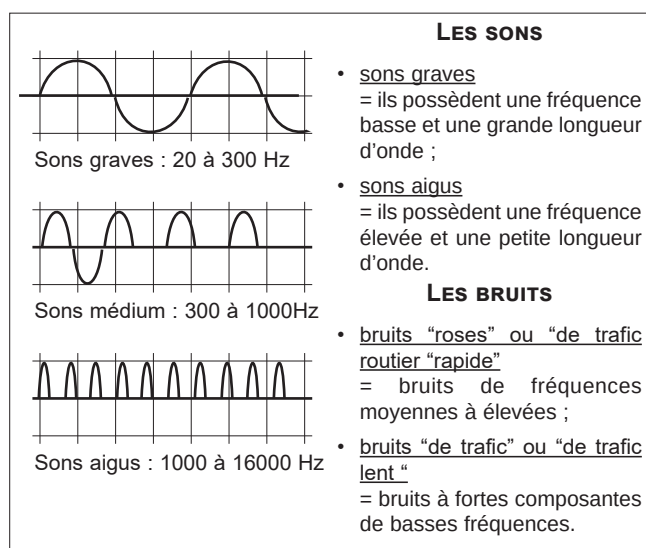
Il existe différents types de bruits : les bruits aériens (par exemple : bruits de fond, bruits de trafic) et les bruits d'impact (par exemple sur les vitrages inclinés).

Du point de vue de la tonalité, le bruit émis par la circulation n'est pas partout le même.

En effet, un trafic à circulation rapide n'a pas la même tonalité que le bruit grave d'un moteur d'autobus ou du trafic urbain plus lent.

Ce paramètre a un rôle considérable car il est beaucoup plus difficile, dans la pratique, de réaliser une isolation aux sons graves.

Avec le renforcement des exigences au niveau de l'isolation thermique et de l'étanchéité à l'air, la qualité acoustique des bâtiments devient également meilleure.



LES FONCTIONS ET PERFORMANCES DE L'ENVELOPPE

VALEURS INDICATIVES DU NIVEAU DE L'AMBIANCE SONORE MESURÉE À L'AIR LIBRE [dB(A)] (ZONE D'ACTIVITÉS EXTÉRIEURES)		DE JOUR	EN SOIRÉE	DE NUIT
1	Zones rurales et zones de séjour récréatif, à l'exception des zones reprises aux points 2, 3 et 8.	40	35	30
2	Zones résidentielles, zones rurales (excepté les zones tampons) et zones de loisirs situées à moins de 500 m d'une zone industrielle non citée au point 3 ou d'une zone d'équipements collectifs ou d'utilité publique.	50	45	45
3	Zones résidentielles, zones rurales (excepté les zones tampons), zones de séjour récréatif à moins de 500 m d'une zone d'activités artisanales, d'une zone de PME, d'une zone de services ou d'une zone d'exploitation pendant la période d'activité.	50	45	40
4	Zones résidentielles, excepté celles reprises aux points 2 et 3.	45	40	35
5	Zones industrielles, zones de services, zones d'équipements collectifs ou d'utilité publique et zones d'exploitation pendant la période d'activité.	60	55	55
6	Zones de loisirs, à l'exception de celles reprises au point 2, et zones de séjour récréatif.	50	45	40
7	Autres zones, à l'exception des zones tampons, domaines militaires et zones auxquelles s'appliquent des valeurs indicatives fixées par décret particulier.	45	40	35
8	Zones tampons.	55	50	50

VALEURS INDICATIVES DU NIVEAU DE L'AMBIANCE SONORE
SELON LES ACTIVITÉS EXTÉRIEURES [IBN -08]

LOCAUX	NIVEAU DE PRESSION ACOUSTIQUE DE... [dB] À ... [dB]	
Chambres, bibliothèques	20	30
Appartements, locaux de séjour	20	40
Ecoles	25	40
Salles de cinéma et de conférences	30	40
Bureau individuel	30	45
Bureau collectif	40	50
Salle de dactylographie	45	55
Grands magasins, restaurants	45	55

NIVEAUX DE PRESSIONS ACOUSTIQUES ADMISSIBLES
À L'INTÉRIEUR DES LOCAUX [IBN -08]

• Le bruit en fonction du contexte et des activités

Les activités extérieures sont, en général, sources de bruits aériens qu'il faut atténuer.

- Selon le contexte urbanistique

Selon qu'il s'agisse d'une zone rurale, d'une zone de séjour récréatif, d'une zone résidentielle, ..., et selon le moment de la journée, un certain niveau de bruit est habituellement rencontré : le tableau ci-contre donne les valeurs de niveau de l'ambiance sonore mesurée habituellement soit à l'air libre, soit dans des locaux. Notons que, par exemple, une habitation implantée en pleine zone industrielle subira des conditions de bruit plus contraignantes que si elle était implantée en zone rurale.

- Suivant le type d'activités intérieures

Des niveaux sonores maxima résultant de l'interférence de différents bruits ont été établis comme limite supérieure acceptable pour le confort acoustique des occupants : ce sont les niveaux de pressions acoustiques admissibles à l'intérieur des locaux (voir le tableau ci-dessous).

• Le contrôle ou l'atténuation du bruit

Pour atténuer une trop forte transmission directe des bruits extérieurs aériens, l'enveloppe doit d'abord être étanche à l'air.

De plus, elle doit être conçue pour limiter sa propre vibration.

Pour cela, trois systèmes peuvent être utilisés seuls ou en combinaison, l'enveloppe doit :

- avoir une masse importante ;
- intégrer des pièges à sons ;
- être en plusieurs couches de masses différentes, sans contact entre elles, chacune de ces couches éventuellement complétée d'une matière absorbant les sons interposée entre ces couches.

Le choix de l'enveloppe et sa conception d'ensemble jouent un rôle essentiel dans l'atténuation des bruits extérieurs : tout passage d'air (fenêtres, portes, toute jonction) est défavorable en ce qui concerne la transmission des bruits.

LA LUMIÈRE ET LES VUES

Le contrôle de la pénétration de la lumière et sa diffusion dans l'habitat ainsi que le contrôle des vues extérieur-intérieur et intérieur-extérieur influenceront grandement la composition architecturale et architectonique.

Par leurs ouvertures translucides et par l'expression volumique, l'enveloppe, et tous les éléments qui la composent, contribuent largement à créer des conditions de vie très variées à l'intérieur du bâtiment.

LES AUTRES FONCTIONS

LE CONTRÔLE DES ACCÈS

Le besoin de sécurité est un des premiers motifs qui ont amenés l'homme à construire.

L'enveloppe externe lui fournit cette protection mais, par définition, autorise les accès ; ceux-ci doivent pouvoir être contrôlés pour empêcher toutes sortes d'agressions.

LE CONTRÔLE DES EFFRACTIONS

Les ouvertures restent des points sensibles et les éléments de l'enveloppe doivent être suffisamment solides et résister à un démantèlement rapide ou silencieux.

Leur implantation doit permettre un contrôle efficace.

LA RÉSISTANCE ET LA RÉACTION AU FEU

L'enveloppe doit être conçue de façon à empêcher un incendie de se communiquer aux étages et à l'immeuble voisin ou l'inverse.

Ceci implique une réaction au feu acceptable des matériaux de parement et une bonne résistance au feu de l'ensemble de l'enveloppe.

Les normes de base définissent ces performances.

LA FONCTION STRUCTURALE

La fonction structurale est la capacité de l'enveloppe à résister aux charges, à savoir :

- le poids propre ou poids mort de tous les éléments eux-mêmes (planchers, toitures, murs, etc.) ;
- les charges extérieures (dans tous les cas : pressions et dépressions dues au vent) et/ou surcharges (trafic, neige, eau, etc.) ;
- les vibrations sismiques, de trafic, etc. ;
- les charges intérieures et/ou surcharges d'utilisation.

LA FONCTION VISUELLE ET "D'ASPECT"

L'enveloppe avec sa volumétrie, ses façades, ses toitures et ses ouvertures (portes et fenêtres) expriment l'architecture d'un bâtiment et contribuent à son intégration dans l'environnement. Elle contribue pour une part essentielle à l'architecture urbaine ou rurale des espaces extérieurs.

Ce sont les matériaux, les ouvertures et tous les éléments qui composent l'enveloppe (en ce compris les balcons, loggias,...) qui permettent de recevoir, de réfléchir la lumière et d'agir sur l'expression lumineuse.

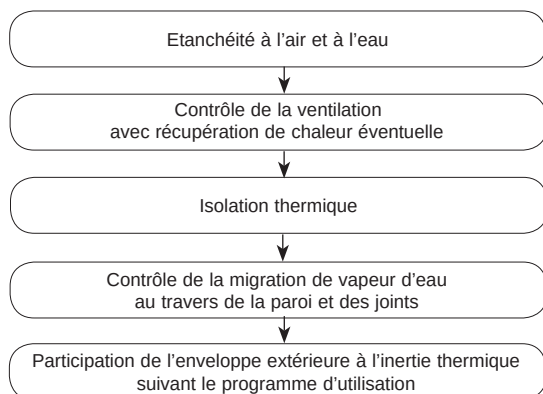
Dans le temps, la peau extérieure d'un bâtiment est amenée à changer d'apparence mais différemment selon la nature des matériaux et les conditions d'exposition.

Il faut donc choisir des matériaux qui vieilliront au mieux en fonction des conditions d'exposition et composer la peau extérieure pour que le vieillissement se réalise selon une évolution désirée.

L'ENVELOPPE ET L'HYGROTHERMIE

LES RÔLES DE L'ENVELOPPE EN CE QUI CONCERNE L'HYGROTHERMIE	26
LES CINQ PRINCIPES LIÉS À L'HYGROTHERMIE	26
L'ÉTANCHÉITÉ À L'EAU ET À L'AIR.....	26
L'ÉTANCHÉITÉ À L'EAU	26
<i>La barrière extérieure perméable à l'eau.....</i>	26
<i>La barrière extérieure étanche à l'eau.....</i>	27
<i>La coulisse de séparation drainante</i>	27
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	27
<i>La "mesure" de l'étanchéité à l'air.....</i>	28
<i>L'étanchéité à l'air des portes et des fenêtres.....</i>	29
<i>L'étanchéité à l'air dans la PEB</i>	29
LE CONTRÔLE DE LA VENTILATION	30
LES BESOINS DE VENTILATION	31
<i>Les exigences réglementaires pour les bâtiments résidentiels.....</i>	31
<i>Les exigences réglementaires pour les immeubles non résidentiels</i>	32
LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE VENTILATION.....	33
L'ISOLATION THERMIQUE CONTINUE	34
LES DÉPERDITIONS DE L'ENVELOPPE, PAR TRANSMISSION.....	34
<i>Le calcul de la résistance thermique R d'une paroi.....</i>	34
<i>Le calcul du coefficient de transmission thermique U d'une paroi.....</i>	36
<i>Le calcul des pertes par transmission P_e de l'enveloppe.....</i>	36
<i>L'influence des ponts thermiques.....</i>	36
<i>Les nœuds constructifs.....</i>	38
LE CONTRÔLE DE LA MIGRATION DE VAPEUR AU TRAVERS DE LA PAROI	40
LE PRINCIPE DE LA DIFFUSION DE VAPEUR : RÉSISTANCE DÉGRESSIVE.....	40
LA PARTICIPATION DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE À L'INERTIE THERMIQUE	42
L'INERTIE THERMIQUE : PRINCIPE ET DÉFINITION.....	42
<i>Le principe.....</i>	42
<i>De quoi dépend l'inertie thermique ?.....</i>	42
<i>L'inertie de transmission et l'inertie d'absorption.....</i>	43
<i>L'approche simplifiée, dans le cadre de la PEB.....</i>	44
LES EFFETS DE L'INERTIE.....	44
<i>Exemple 1 : Hiver - Journée froide - Chauffage (occupation permanente).....</i>	45
<i>Exemple 2 : Printemps - Journée moins froide et ensoleillée - Chauffage (occupation permanente).....</i>	45
<i>Exemple 3 : Été - Journée ensoleillée - Fenêtres ouvertes.....</i>	46
<i>Exemple 4 : Été - Journée ensoleillée - Fenêtres fermées.....</i>	47
LA POSITION DE L'ISOLATION THERMIQUE DANS LA PAROI	48

LES RÔLES DE L'ENVELOPPE EN CE QUI CONCERNE L'HYGROTHERMIE



Protectrice et régulatrice des échanges entre milieu intérieur et milieu extérieur, l'enveloppe se doit de jouer un rôle essentiel pour limiter la consommation d'énergie tout en créant en toute saison un climat sain et agréable à l'intérieur du bâtiment.

LES CINQ PRINCIPES LIÉS À L'HYGROTHERMIE

Les grands principes liés à l'hygrothermie sont repris ci-contre et seront développés dans les prochaines pages.

L'ÉTANCHÉITÉ À L'EAU ET À L'AIR

L'ÉTANCHÉITÉ À L'EAU

Il est primordial de concevoir l'enveloppe pour éviter toute pénétration d'eau dans le bâtiment et dans la plupart des cas dans l'enveloppe elle-même.

Il existe trois systèmes de base pour garder l'intérieur d'un bâtiment au sec :

- la barrière extérieure perméable ;
- la barrière extérieure étanche à l'eau ;
- la séparation entre la barrière extérieure et la partie intérieure isolante de l'enveloppe par une coulisse continue et drainée.

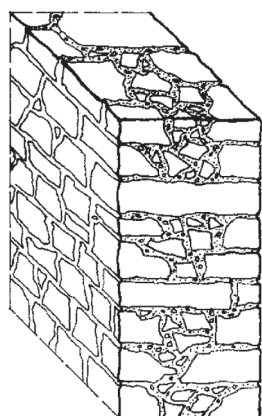
LA BARRIÈRE EXTÉRIEURE PERMÉABLE À L'EAU

Elle est constituée essentiellement de matériaux maçonnés, banchés ou tressés dans lesquels l'eau de pluie peut éventuellement pénétrer en quantité réduite.

Sa constitution permet à cette eau de s'évaporer avec le vent et le soleil, ainsi que grâce à la chaleur venant de l'intérieur, avant d'atteindre la face intérieure de l'enveloppe.

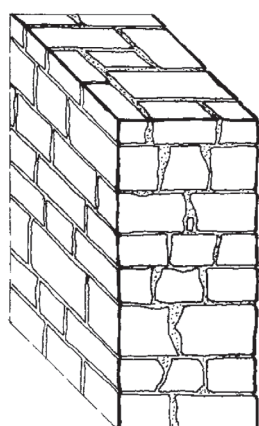
Dans les maçonneries en pierre, l'eau a tendance à s'infiltrer par les joints et à être drainée par le cœur du mur si celui-ci est épais. Les murs en briques, plus poreuses que les pierres, sont plus étanches.

Ce système est principalement d'application dans les murs pleins épais en maçonnerie apparente et dans les toitures en chaume (à l'ancienne).



MUR PLEIN EN MOELLONS DE PIERRE À DEUX PAREMENTS

reliés par des grandes pierres traversantes et bloqués par des déchets et mortier de terre et de chaux.



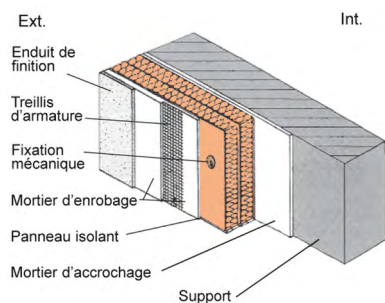
MUR PLEIN EN MOELLONS DE PIERRE APPAREILLÉS

ATTENTION

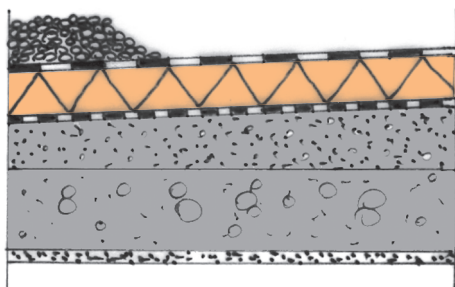
L'apport d'une isolation thermique par l'intérieur pourrait limiter l'assèchement naturel du mur existant.

De plus, une coupure horizontale doit empêcher l'eau entrée dans le matériau en contact avec le sol de monter par capillarité.

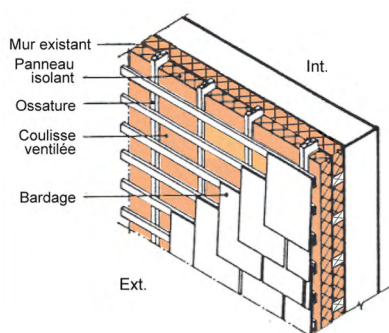
Pour répondre aux exigences PEB, l'utilisation de cette technique conduit à des épaisseurs considérables, aujourd'hui incompatibles avec des impératifs économiques, tout en mobilisant un espace important.



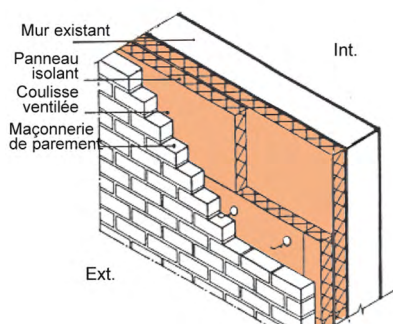
PANNEAUX D'ISOLATION RECOUVERTS D'UN ENDUIT



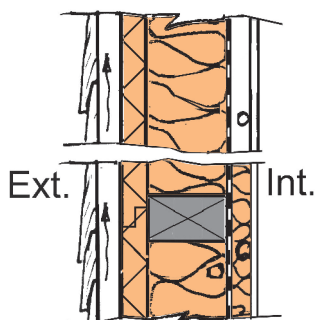
TOITURE PLATE DE TYPE "CHAUDE"



PANNEAUX D'ISOLATION PROTÉGÉS PAR UN BARDAGE RAPPORTÉ



PANNEAUX D'ISOLATION PROTÉGÉS PAR UN PAREMENT EN MAÇONNERIE



PAROI À OSSATURE BOIS AVEC BARDAGE

LA BARRIÈRE EXTÉRIEURE ÉTANCHE À L'EAU

Celle-ci consiste à appliquer directement sur la paroi extérieure un revêtement complètement étanche à l'eau. Cette solution est très efficace pour autant que soient résolus les problèmes importants :

- d'étanchéité : que ce soit au niveau des joints et de chacune des parois (pas de fissuration) ;
- de diffusion de vapeur : la résistance à la diffusion de vapeur doit être décroissante au travers de toutes les couches composant une paroi, et ce, de la face la plus intérieure vers la face la plus extérieure de l'enveloppe (avec des nuances suivant le climat intérieur) ; pour réaliser cela, un matériau pare-vapeur doit être placé du côté intérieur de la paroi.

Ce système est largement utilisé en toiture plate, en parois en contact avec le sol, dans les toitures et les parois en panneaux sandwich, les tôles avec une isolation complémentaire et dans les murs avec une finition crépie.

LA COULISSE DE SÉPARATION DRAINANTE

La coulisse consiste à établir une coupure entre la barrière extérieure (perméable, semi-perméable ou étanche à l'eau) et la partie isolante intérieure de la paroi. Elle assure l'étanchéité à l'air et, complète éventuellement, l'étanchéité à l'eau.

Qu'elle provienne de la pluie ayant traversé le parement ou qu'elle résulte d'une condensation de la vapeur d'eau, l'eau est admise en très faible quantité sur la face intérieure du parement extérieur à l'intérieur de la coulisse, pour autant qu'un système de drainage soit prévu ainsi que, dans certains cas, un dispositif de ventilation de cette coulisse ; c'est le cas des murs creux, des toitures inclinées (avec ventilation entre la couverture et la sous-toiture), et de la plupart des bardages, etc.

Ce système est le plus largement utilisé pour les parois d'enveloppe en contact avec l'extérieur.

Il est important de concevoir la barrière d'étanchéité en fonction de la pluie battante et de l'effet du vent sur l'écoulement de l'eau.

C'est particulièrement d'application aux endroits des joints entre les éléments des différentes parois.

Tous les joints étanches à l'eau par leur forme sont à privilégier par rapport à ceux ne trouvant leur efficacité que par les mastics qui les colmatent.

Pour les parois enterrées, ce système de coulisse peut aussi être exploité mais la poussée des terres doit être prise en compte lors de la conception.

L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

Les notions de confort thermique et d'hygiène d'un local sont liées autant à la température de l'air ambiant qu'à la

REMARQUE

L'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure joue un rôle important pour la performance d'une installation de ventilation. Une installation efficace va de pair avec une bonne étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure, dans laquelle les ouvertures pratiquées sont intentionnelles. Les fuites d'air incontrôlées peuvent, en effet, provoquer un court-circuit du flux de ventilation, la dispersion des odeurs et des polluants, une consommation exagérée d'énergie, des courants d'air...



TEST D'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

LA SURFACE DE FUITE EQUIVALENTE ET LA SURFACE DE FUITE NORMALISÉE

L'étanchéité à l'air d'un bâtiment est caractérisée par la Surface de Fuite Equivalente (SFE), en anglais : Equivalent Leakage Area (ELA).

Cette SFE correspond à la surface, exprimée en cm², d'un orifice au contour défini, qui permettrait un écoulement d'air comparable à celui qui se fait par l'ensemble des infiltrations au travers de l'enveloppe du bâtiment.

En divisant la SFE par la superficie totale de l'enveloppe du bâtiment, on obtient une Surface de Fuite Normalisée, exprimée en cm² de surface de fuite par m² de surface d'enveloppe du bâtiment, paramètre permettant de comparer, entre bâtiments, l'étanchéité à l'air.

température moyenne des parois.

Dans le cadre de la gestion de l'énergie, pour que l'air ambiant puisse être chauffé ou refroidi avec la plus faible consommation d'énergie possible et suivant un contrôle précis, il est évident qu'il faut maîtriser les échanges d'air entre l'extérieur et l'intérieur.

Les infiltrations naturelles de l'air dans un bâtiment sont dues à des différences de pression entre l'extérieur et l'intérieur ; celles-ci sont engendrées par le vent et/ou par l'écart de température de part et d'autre de l'enveloppe extérieure.

Lorsqu'on parle d'étanchéité à l'air des bâtiments, on pense souvent à l'étanchéité des fenêtres et des portes mais, malgré le perfectionnement des méthodes de construction (pare-vapeur continu, membranes spécifiques, plâtre continu, etc.), c'est généralement au niveau des joints entre les différents éléments composant l'enveloppe protégée qu'il y a des risques de manque d'étanchéité à l'air.

LA "MESURE" DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

L'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure peut être mesurée de manière relativement simple par un essai dit de "pressurisation".

Cet essai consiste à placer, dans une porte ou une baie de fenêtre, un ou plusieurs ventilateurs qui mettent l'habitation en dépression ou en surpression. On détermine ainsi la relation entre la différence de pression au niveau de l'enveloppe du bâtiment et le débit d'air.

Ensuite, un calcul de régression permet de déterminer le débit d'air pour une différence de pression de 50 Pa. Le rapport entre le débit d'air et le volume du bâtiment indique le taux de ventilation pour une différence de pression de 50 Pa, c'est-à-dire la valeur n_{50} .

Cette valeur n_{50} permet d'évaluer le taux de ventilation saisonnier moyen n_{sb} , qui ne tient compte que du débit d'infiltration d'air par les fuites à travers l'enveloppe du bâtiment.

Cette valeur est obtenue par la formule :

$$n_{sb} = \frac{n_{50}}{a}$$

12 m³/hm² correspondent à une fuite d'air de 12 m³/h pour chaque m² de surface de volume protégé pour une différence de pression de 50 Pa.

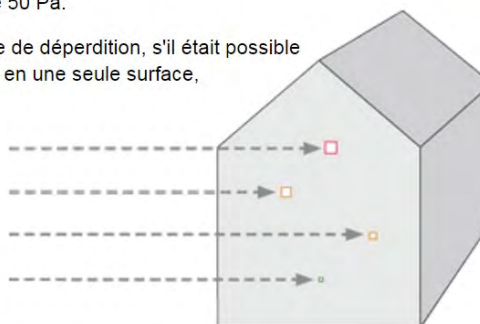
Pour une habitation moyenne de 300 m² de surface de déperdition, s'il était possible de cumuler toutes les imperfections de l'enveloppe en une seule surface, voici à quoi correspondrait chaque valeur V_{50} :

12 m³/hm² → un percement de 42 cm x 42 cm

8 m³/hm² → un percement de 35 cm x 35 cm

3 m³/hm² → un percement de 21 cm x 21 cm

1 m³/hm² → un percement de 12 cm x 12 cm



Cette surface représente l'ouverture par laquelle la chaleur s'échappe et le froid s'insinue.

L'objectif est d'arriver à réduire cette ouverture à la plus petite dimension possible afin de limiter les pertes d'énergie.

REMARQUE

On peut également déterminer le taux de renouvellement d'air grâce à la méthode du "gaz-traceur" : on introduit un gaz inerte dans un local et, en observant l'évolution de sa concentration au cours du temps, on peut évaluer le taux de renouvellement d'air du local.

Cette méthode nécessite un équipement sophistiqué comprenant un dispositif d'injection et d'analyse de concentration du gaz. Le protocole de mesure est défini dans la norme NBN EN ISO 12569 : 2012. [IBN -12]

où le facteur "a" dépend de l'influence du vent sur l'habitation :

- a = 30 pour les habitations protégées du vent ;
- a = 20 pour les habitations fortement exposées.

Généralement, on affecte au facteur "a" une valeur de 25 (protection moyenne).

L'étanchéité à l'air moyenne de l'habitat belge s'élève à environ $n_{50} = 8,7 \text{ h}^{-1}$, correspondant à 8,7 renouvellements d'air par heure. Si beaucoup de bâtiments existants sont loin d'être suffisamment étanches à l'air, cette performance s'améliore avec les bâtiments plus récents (voir figure page suivante).

Les détails architectoniques des jonctions entre éléments fonctionnels et sous-éléments doivent être parfaitement étudiés et soignés lors de la mise en oeuvre pour assurer une étanchéité à l'air la plus efficace possible.

L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DES PORTES ET DES FENÊTRES

CLASSE DE PERMÉABILITÉ À L'EAU REQUISE DES FENÊTRES, MESURÉE SUIVANT NBN EN 12208 [IBN -00-3] (SELON STS 52 [SPFE-05])

Hauteur au-dessus du sol	Rugosité du terrain			
	Ville IV	Boisée III	Campagne II	Mer ⁽¹⁾ I
0 à 10 m du sol	4A ⁽²⁾	4A ⁽²⁾	6A ⁽²⁾	8A
10 à 18 m du sol	4A ⁽²⁾	6A ⁽²⁾	8A ⁽²⁾	9A
18 à 25 m du sol	6A ⁽²⁾	8A	9A	9A
25 à 50 m du sol	8A ⁽²⁾	9A	9A	9A
50 à 100 m du sol	9A	Rem ⁽³⁾	Rem ⁽³⁾	Rem ⁽³⁾
> 100 m du sol	Rem ⁽³⁾			

(1) Bord de mer : zone allant jusqu'à 2000 m de la digue ou à défaut de digue, de la ligne des hautes eaux d'équinoxe.

(2) Pour des fenêtres et portes-fenêtres non protégées, le cahier spécial des charges peut prescrire une pression d'essai de 100 Pa supérieure à celle prescrite dans les STS 52, à savoir : 150 Pa pour la classe 4A, 250 Pa pour la classe 6A, 450 Pa pour la classe 8A et 600 Pa pour la classe 9A.

(3) Le cahier spécial des charges spécifie la pression maximale de l'essai.

Il existe des méthodes d'essais normalisées, ainsi que des valeurs maximales admissibles pour le débit d'air par mètre de joint de menuiserie.

L'essai de perméabilité à l'air est effectué conformément à la NBN EN 1026.

La classe de performance est attribuée sur base de la NBN EN 12207.

Les exigences sont définies dans les STS 52 révisées : on distingue quatre classes de perméabilité à l'air (1, 2, 3 et 4), qui donnent un débit de fuite d'air maximum admissible par mètre de joint de menuiserie en fonction de la différence de pression.

Les exigences sont exprimées en fonction de l'action du vent (hauteur du bâtiment) : voir tableau ci-contre.

Sauf stipulation contraire dans le cahier spécial des charges, les niveaux de performances requis sont déterminés à l'aide de ce tableau, qui tient compte de divers facteurs d'influence et d'utilisation.

Pour une bonne gestion de l'énergie, il faut limiter au maximum, tout passage d'air non contrôlé au travers de l'enveloppe.

L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DANS LA PEB

Deux options se présentent au responsable PEB dans le cadre de la PEB :

- Soit aucun test d'étanchéité à l'air n'a été effectué, il faut prendre la valeur par défaut de $\dot{V}_{50} = 12 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Cette valeur est très défavorable et a un impact assez important sur la valeur Espec. Cette valeur est expliquée plus loin dans le guide.
- Soit un test d'étanchéité a été effectué, dès lors et conformément aux spécifications de la Région wallonne, celui-ci permet d'obtenir la valeur $\dot{V}_{50}$ à prendre en considération. Le document attestant cette valeur est à joindre à la déclaration. Le test doit être réalisé conformément à la norme NBN EN 13829:2001.

CLASSIFICATION DE QUELQUES FUTILES COURANTES

FUITES IMPORTANTES

Ouvertures non obturables pour la ventilation des locaux de chaufferie, des cages d'ascenseur, des gaines techniques, des garages, des espaces hébergeant des compteurs à gaz, etc.

Feux ouverts, coffres à volets, chatières, boîtes aux lettres, etc.

Portes de garage

Raccords du pare-vapeur de toiture au gros oeuvre

Surfaces maçonnées non enduites (si elles sont importantes)

Traverse inférieure des portes

Pieds de mur des constructions en bois

FUITES MOYENNEMENT IMPORTANTES

Passage des installations techniques

Encastrement de spots, de prises électriques, etc.

Contours de baies, y compris des fenêtres de toit

FUITES PEU IMPORTANTES

Pieds de mur des constructions massives

FUITES MARGINALES

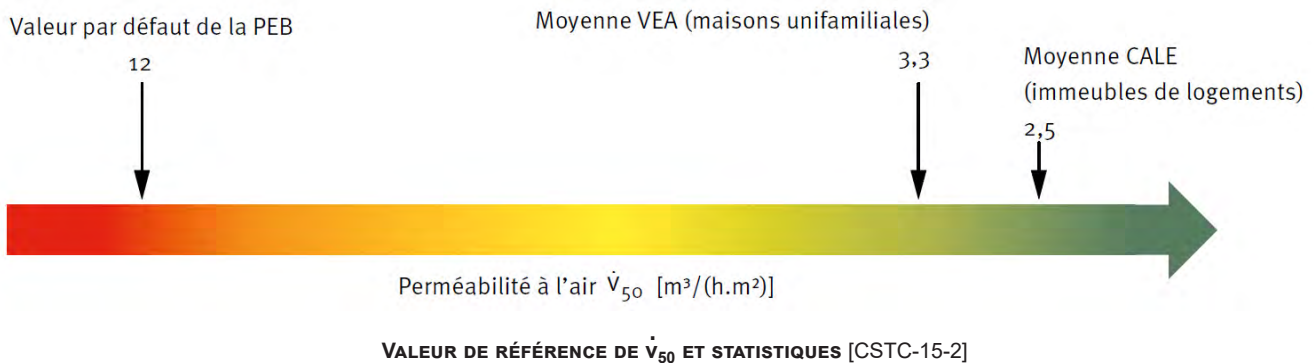
Liaisons murs de refend-façade dans les constructions en maçonnerie

CLASSIFICATION DE QUELQUES FUTILES COURANTES [CSTC-15-2]

Dans la norme NBN EN 13829, deux méthodes pour effectuer les tests d'étanchéité sont présentées. Il s'agit de la méthode A (essai d'un bâtiment utilisé) et de la méthode B (essai de l'enveloppe du bâtiment). Pour la méthode A, le test est réalisé lorsque l'état de l'enveloppe du bâtiment représente son état pendant la saison où l'on utilise les systèmes de chauffage et de refroidissement. C'est la méthode à utiliser dans le cadre de la PEB ; le bâtiment est testé alors qu'il est parfaitement utilisable et toute ouverture volontaire dans l'enveloppe du bâtiment reste ouverte.

Dans le cadre de la méthode B, toute ouverture volontaire dans l'enveloppe du bâtiment doit être fermée ou scellée. Ce test (méthode B) est à réaliser lorsque l'enveloppe étanche est terminée et qu'il est encore possible d'améliorer cette enveloppe étanche. Il permet dès lors de vérifier l'étanchéité de l'enveloppe avant de poser les finitions et les systèmes bien avant la réalisation du test selon la méthode A nécessaire pour l'encodage dans logiciel PEB.

ATTENTION, la valeur de $12 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ qui est la valeur reprise par défaut dans la PEB engendre une perte assez importante via in- et exfiltration engendrant une valeur E_w et E_{spec} beaucoup plus défavorable que si la valeur d'étanchéité à l'air du bâtiment $\dot{V}_{50}$ se rapprochait de $1 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, valeur dont se rapprochent les bâtiments les plus récents. Il est dès conseillé aux auteurs de projet de prévoir des prescriptions particulières concernant l'étanchéité à l'air du bâtiment et d'en tester l'étanchéité à l'air en fin de chantier.



Une ventilation efficace ne suffit pas pour éviter tout problème de condensation. Il faut également une bonne isolation thermique des parois extérieures et un chauffage correct des locaux afin d'atteindre des températures de surface suffisamment élevées.

LE CONTRÔLE DE LA VENTILATION

L'enveloppe extérieure des habitations récentes est de mieux en mieux isolée thermiquement et de plus en plus étanche à l'air.

En l'absence de ventilation, l'air intérieur est de moins en moins renouvelé ; l'humidité n'étant plus évacuée, son taux augmente et finit par causer des dégâts importants (moisissures, détérioration des peintures, etc.).

Il faut donc ventiler afin d'évacuer le surplus de vapeur produite par :

- les activités des occupants ;
- les occupants eux-mêmes ;
- humidité de construction pendant le séchage du bâtiment.

Il faut également renouveler l'air pollué par de l'air non pollué.

Une ventilation permanente, associée à une bonne isolation et une bonne étanchéité à l'air, permet d'atteindre trois objectifs majeurs :

- l'économie d'énergie ;
- le confort thermique ;
- la qualité de l'air.

LES BESOINS DE VENTILATION

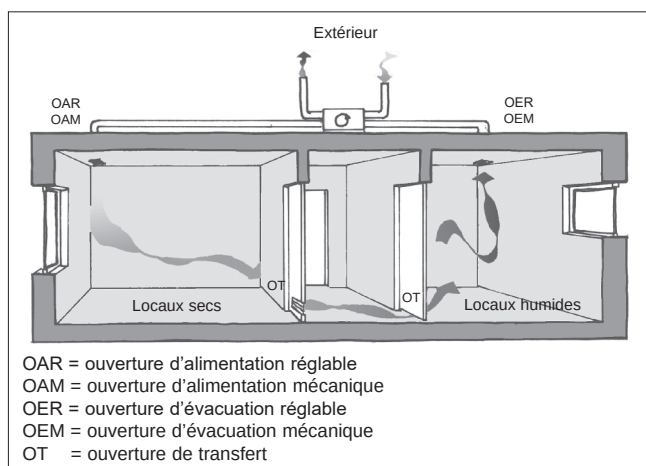
Un aspect essentiel d'une installation de ventilation est la détermination du taux de renouvellement d'air nécessaire à l'espace ventilé.

La ventilation doit rester suffisante afin d'empêcher l'accumulation d'agents contaminants dans l'air intérieur et de permettre aux occupants de respirer un air sain.

Il ne faut cependant pas oublier qu'une ventilation exagérée peut compromettre le confort, créer des courants d'air et réduire excessivement le niveau d'humidité.

Les besoins de ventilation hygiénique varient en fonction de la densité d'occupation de l'utilisation du bâtiment, ainsi que de l'environnement extérieur (pollution, etc.).

Pour des raisons de simplification, l'installation de ventilation doit être basée sur un taux de renouvellement d'air minimum défini par les normes et règlements, avec des conditions spéciales pour des problèmes spécifiques.



LES EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES POUR LES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS

La norme belge NBN D50-001 [NBN-91] donne des directives permettant de construire des habitations qui pourront être convenablement ventilées. Pour les bâtiments résidentiels, la référence réglementaire est l'Annexe C2-VHR de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2]. Celle-ci renvoie, notamment, à la NBN D 50-001.

	ALIMENTATION EN AIR NEUF		TRANSFERT	ÉVACUATION DE L'AIR VICIÉ		
	Locaux secs		Ouvertures de transfert	Locaux humides		
	Séjour	Chambre, bureau, salle de jeux	Hall, espace de passage	Cuisine ouverte	Cuisine fermée, salle de bains, buanderie	W.-C.
Débit minimum	75 m³/h	25 m³/h	Débit minimum ou section libre (2): 25 m³/h ou 70 cm² (3)	75 m³/h	50 m³/h	25 m³/h
le débit peut être limité à	150 m³/h	72 m³/h (1)		-	75 m³/h	-
Débit maximum (exigence en ventilation naturelle)	≤ 2 q	≤ 2 q	Exception pour cuisine équipée: 50 m³/h ou 140 cm² (4)	-	-	-

(1) Cette nouvelle limite, fixée par la réglementation PEB, remplace celle de la norme NBN D50-001.

(2) Il s'agit de la section libre des ouvertures de transfert lorsqu'elles sont constituées de fentes sous les portes.

(3) En approximation : 70 cm² correspond à une fente de 1 cm de haut pour une porte de 70 cm de large.

(4) En approximation : 140 cm² correspond à une fente de 2 cm de haut pour une porte de 70 cm de large.

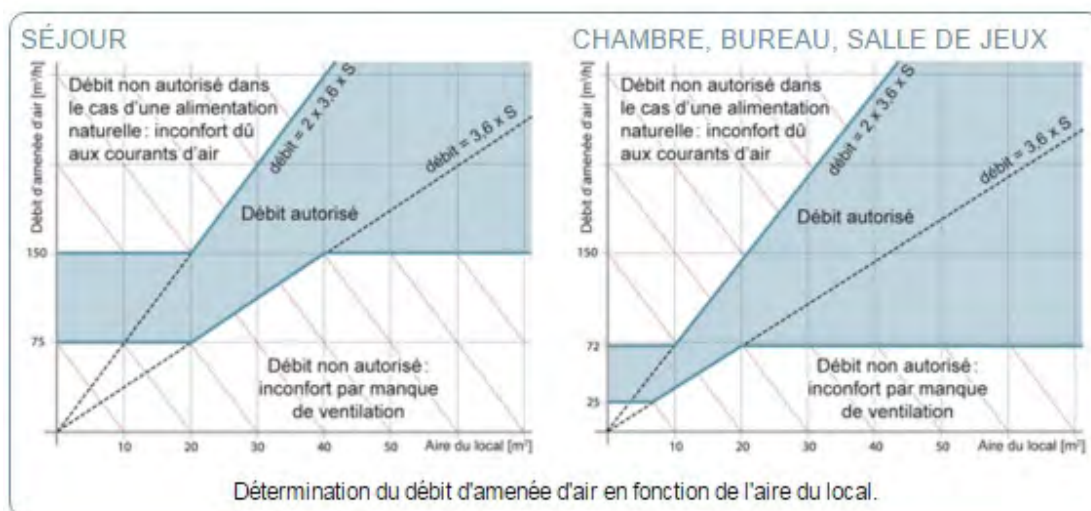
Le débit de ventilation q [m³/h], dans chaque local, est calculé sur base d'un débit normalisé de 3,6 m³/h par m² de plancher :

$$q \text{ [m³/h]} = 3,6 \times \text{aire du local}$$

Le débit doit respecter les limites reprises dans le tableau ci-contre.

PRINCIPE DE BASE DU DÉBIT DE VENTILATION DANS CHAQUE LOCAL, DANS LES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS [BALT-02]

La figure qui suit illustre l'application des valeurs limites dans la détermination du débit de ventilation d'un séjour et d'une chambre, bureau ou salle de jeux.



EXEMPLES DE DÉTERMINATION DU DÉBIT D'AMENÉE D'AIR EN FONCTION DE L'AIRE DU LOCAL [BALT-02]

Les dispositifs à prévoir pour la ventilation de base sont :

- une amenée d'air dans les espaces dits "secs" : séjour, chambres, bureau, etc. ;
- des ouvertures de transfert au droit des portes et/ou des murs intérieurs entre les locaux "secs" et les locaux dits "humides" (W.-C., salle de bain, cuisine, etc.) ;
- une évacuation d'air au départ d'espaces dits "humides", vers l'extérieur.

En plus, une ventilation intensive ou périodique est nécessaire pour évacuer des odeurs désagréables exceptionnelles et temporaires ou en cas de surchauffe thermique temporaire.

Les pièces d'habitations, les cuisines, les salles de bains, les W.-C. et les buanderies, sont soumis aux exigences de la ventilation de base.

Outre ces pièces, il existe, dans les bâtiments d'habitation, d'autres locaux qui doivent également être ventilés et qui font l'objet d'exigences spécifiques dans la norme belge.

Il s'agit notamment des garages, des caves, des greniers, des chaufferies.

LES EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES POUR LES IMMEUBLES NON RÉSIDENTIELS

Pour les bâtiments non résidentiels (excepté les industriels), la référence réglementaire est l'Annexe C3-VHN de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2]. Cette annexe fait plusieurs fois référence à des dispositions tirées d'autres publications dont voici la liste :

1. NBN EN 12792:2003 Ventilation des bâtiments – Symboles, terminologie et symboles graphiques
2. NBN EN 12599:2000 Ventilation des bâtiments – Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisations installées
3. NBN EN 13779:2004 Ventilation dans les bâtiments

non résidentiels – spécification des performances pour les systèmes de ventilation et de climatisation

4. NBN EN 13141-1:2004 Ventilation des bâtiments - Essais des performances des composants/produits pour la ventilation des logements - Partie 1: Dispositifs de transfert d'air montés en extérieur et en intérieur
5. NBN EN 13141-2:2004 Ventilation des Bâtiments - Essais des performances des composants/produits pour la ventilation des logements - Partie 2: Bouches d'air d'évacuation et d'alimentation
6. NBN EN 1027:2000 Fenêtres et portes - Perméabilité à l'eau – Méthode d'essai
7. NBN EN 13829:2001 Performance thermique des bâtiments - Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments - Méthode de pressurisation par ventilateur

LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE VENTILATION

Dans un premier temps, il faut choisir le type d'installation de ventilation (naturelle, simple flux, double flux) en fonction non seulement des contraintes imposées par le type de bâtiment, le climat, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure et l'environnement, mais aussi de celles induites par le coût et la performance de l'installation, l'énergie d'utilisation et la facilité de maintenance.

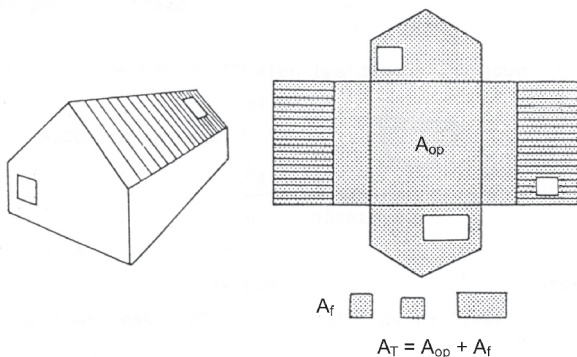
La norme belge NBN D50-001 distingue quatre systèmes de ventilation (voir ci-contre) ; chaque système et ses composants sont examinés dans le Guide pratique pour architectes "*La ventilation et l'énergie*" [HAUG-17-3].

Dans le cadre de la PEB, les pertes par ventilation sont calculées forfaitairement sur base du volume du secteur énergétique concerné, de la même manière pour tous les systèmes (pour la valeur par défaut du facteur m). Ainsi, on considère qu'il faut toujours assurer un minimum de ventilation pour la durabilité du bâtiment mais également pour la santé des occupants. Mais il y a différentes possibilités de diminuer les pertes calculées forfaitairement par le choix de certains systèmes appropriés, avec notamment, la récupération de chaleur (système D), l'autorégulabilité des ouvertures d'alimentation naturelles (système A et C), le bon réglage des débits démontré par une mesure des débits mécaniques, etc.

L'ISOLATION THERMIQUE CONTINUE

LES DÉPERDITIONS DE L'ENVELOPPE, PAR TRANSMISSION

Le **volume protégé V** comprend tous les espaces chauffés directement ou indirectement et qui sont thermiquement isolés de l'ambiance extérieure, du sol ou d'espace voisin non à l'abri du gel (voir la définition complète à la page 6). Il peut englober des locaux indirectement chauffés ne faisant pas partie du **volume chauffé**.



On décompose l'enveloppe du **volume protégé** en ses parois de déperditions thermiques, séparant le volume protégé de l'extérieur ou d'espaces non chauffés.

Le volume protégé, VP, est constitué par l'ensemble des espaces que l'on souhaite protéger des déperditions thermiques vers l'environnement extérieur, le sol et tous les espaces adjacents non chauffés.

Il comprend :

- les espaces chauffés (et/ou refroidis), en continu ou par intermittence ;
- les espaces chauffés indirectement, dépourvus d'un corps de chauffe (couloirs, dégagements...).

La figure ci-contre [HAUG-01] illustre cette décomposition de l'emballage du **volume chauffé** :

- en parois opaques (A_{op}) : murs extérieurs, toitures, planchers, etc. ;
- et en parois vitrées (A_f).

Dans le cadre de la PEB, les surfaces de déperdition de chaleur ainsi que le volume protégé sont déterminés sur base des dimensions extérieures.

Les accès vers les espaces situés hors du volume protégé (caves, greniers...), les murs ou cloisons de la cage d'escalier ainsi que l'escalier lui-même, ou encore une trappe, sont autant de parois du volume protégé. Leur épaisseur complète fait partie du volume protégé.

En procédant ainsi, on définit une surface de déperdition continue qui enveloppe le volume protégé.

Les parois entre deux volumes protégés ne font pas partie des parois de déperdition. Dans ce cas les dimensions extérieures s'arrêtent à l'axe de la paroi de séparation.

LE CALCUL DE LA RÉSISTANCE THERMIQUE R D'UNE PAROI

Chaque paroi, selon sa composition, offre une résistance thermique qui est fonction des matériaux utilisés.

Plus la valeur λ de la conductibilité thermique d'un matériau est faible, plus le matériau est thermiquement isolant. En général, on qualifie un matériau d' "isolant" lorsque la valeur λ est inférieure ou égale à 0,065 W/mK.

Si le λ de l'air sec immobile est de 0,02 W/mK, celui de l'eau est de 0,56 W/mK, ce qui explique que les matériaux mouillés sont plus conducteurs que les matériaux secs.

Les conductibilités thermiques des matériaux homogènes et les résistances thermiques des matériaux non homogènes sont obtenues par essais en laboratoire. Les addenda 1 et 2 de la norme NBN B62-002 fournissent également des listes de valeurs dites "normalisées", correspondant à la qualité minimale que l'on peut être certain d'obtenir pour chaque matériau.

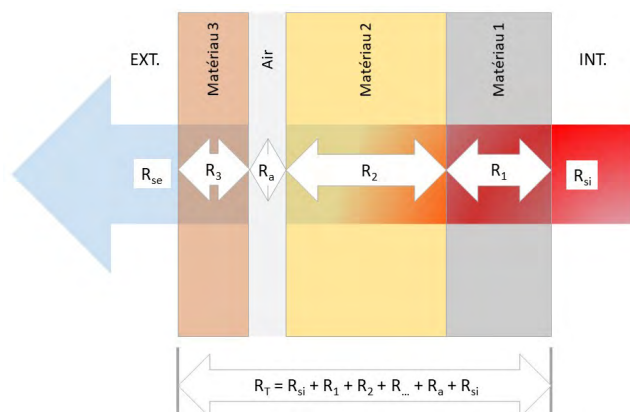
LA RÉSISTANCE THERMIQUE R D'UNE COUCHE DE MATÉRIAU

C'est la capacité qu'a ce matériau de freiner le flux de chaleur à travers lui.

La résistance thermique d'une couche d'un matériau homogène donné est :

- directement proportionnelle à son épaisseur d [m] ;
- indirectement proportionnelle à sa conductivité thermique λ [W/mK].

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$



Pour valoriser la qualité supérieure qu'ils ont conférée à leur produit, les fabricants préfèrent, le plus souvent, démontrer la qualité de leur produit en les soumettant aux essais nécessaires à l'obtention d'un Agrément Technique belge (ATG) ou un Agrément Technique Européen (ATE). La valeur λ ou R reconnue peut être obtenue de trois manières :

- Le produit repris dans la base de données officielle commune aux trois Régions www.epbd.be, qui rassemble les valeurs reconnues dans le cadre de la réglementation PEB et qui est régulièrement mise à jour. Le logiciel PEB contient cette bibliothèque epbd.
- Le produit comporte un marquage CE donnant une valeur λ_D : l'attestation de conformité renseigne la valeur à utiliser.
- Le produit fait l'objet d'un Agrément Technique belge (ATG) ou Européen (ATE) : l'agrément technique indique cette valeur.

La résistance thermique totale d'une paroi étant une somme de résistances, le positionnement relatif des couches de matériaux dans une paroi n'a aucune incidence sur la résistance thermique totale de la paroi, pour autant que les matériaux restent dans un état de siccité comparable.

En ce qui concerne les parois opaques, les normes de calcul des coefficients de transmission s'accordent à considérer que la résistance thermique totale R_t est la somme des résistances thermiques partielles des couches composant la paroi :

$$R_t = R_{si} + \sum \frac{d}{\lambda} + \sum R_u + \sum R_a + R_{se} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

où :

- R_{si} [$\text{m}^2\text{K/W}$] = résistance thermique du côté intérieur de la paroi, que doit vaincre le flux thermique traversant la paroi, pour passer d'un échange par convection, à un échange par conduction ;
- d [m] = épaisseur d'une couche constituée d'un matériau homogène ;
- λ [W/mK] = conductibilité thermique de ce matériau homogène ;
- R_u [$\text{m}^2\text{K/W}$] = résistance thermique utile d'une couche constituée d'un matériau non homogène (blocs creux de béton, par exemple) ;
- R_a [$\text{m}^2\text{K/W}$] = résistance thermique d'une couche d'air (peu, pas ou moyennement ventilée) ;
- R_{se} [$\text{m}^2\text{K/W}$] = résistance thermique du côté extérieur de la paroi, que doit vaincre le flux thermique traversant la paroi, pour passer d'un échange par conduction, à un échange par convection.

L'annexe 2 propose des tableaux de valeurs λ , R_u , R_a , R_{si} et R_{se} , ainsi que les coefficients U de fenêtres selon le matériau du châssis et le type de vitrage.

LE CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE U D'UNE PAROI

Le coefficient de transmission thermique U d'une paroi est, par définition, l'inverse de sa résistance totale :

$$U = \frac{1}{R_t} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Le calcul des coefficients U de parois vitrées est plus particuliers, puisqu'il doit tenir compte des effets de bord induits par l'espaceur entre les feuilles de vitrage, et des caractéristiques du châssis proprement dit.

LE CALCUL DES PERTES PAR TRANSMISSION P_e DE L'ENVELOPPE

Ayant préalablement montré comment déterminer les coefficients de transmission des parois opaques et des parois vitrées, on peut maintenant calculer les pertes par transmission de l'enveloppe P_e par l'expression :

$$P_e = \sum U_i \times A_i \times b + \sum \psi_j \times L_j \quad [\text{W/K}]$$

où :

- U_i [$\text{W/m}^2\text{K}$] = coefficient de déperdition de la paroi de déperdition i ;
- A_i [m^2] = superficie de la paroi i ;
- b [-] = coefficient de réduction à appliquer aux déperditions d'une paroi adjacente à un local non chauffé mais protégé du gel (grenier, cave...) ou en contact avec le sol et, par là, non extérieure.

Cette réduction des déperditions tient compte du fait que la paroi est adjacente à un milieu dont la température est supérieure à celle qui règne à l'extérieur, ce qui réduit d'autant les déperditions à travers cette paroi. Ce coefficient est évidemment égal à 1 pour les parois extérieures elles-mêmes ;

- ψ_j [W/mK] = coefficient de transmission linéique du pont thermique j ;
- L_j [m] = longueur du pont thermique j.

Cette expression ajoute à la somme des superficies de parois, pondérées par leur coefficient de transmission, un terme prenant en compte les ponts thermiques linéaires.

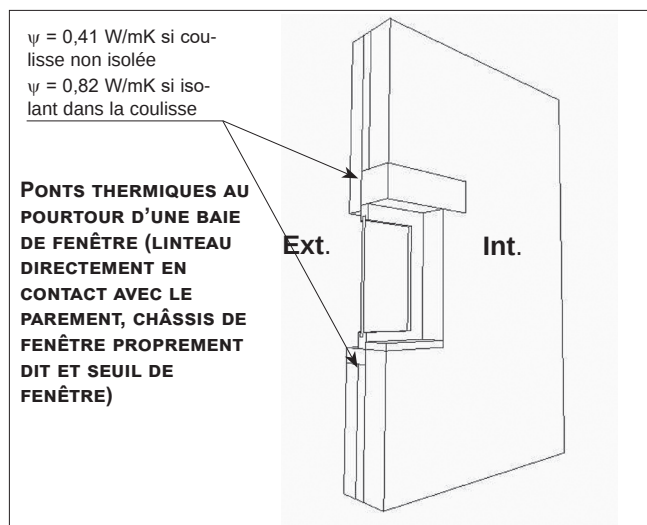
L'INFLUENCE DES PONTS THERMIQUES

L'influence des ponts thermiques est d'autant plus étendue et importante que la paroi dans laquelle ils sont localisés est isolée.

Un pont thermique, dans une paroi, résulte d'une hétérogénéité de l'isolation thermique située localement dans cette paroi, hétérogénéité qui est, le plus souvent, due à la présence d'une liaison structurelle, comme par exemple une colonne en métal ou en béton qui traverse la couche isolante, ou encore comme un linteau directement en contact avec le parement extérieur.

Les ponts thermiques sont la cause d'un accroissement local du flux thermique traversant la paroi.

La configuration des ponts thermiques est plutôt linéaire que surfacique, si bien que l'on calcule les déperditions



qu'ils occasionnent en multipliant leur longueur L par un coefficient de transmission linéique ψ [W/mK].

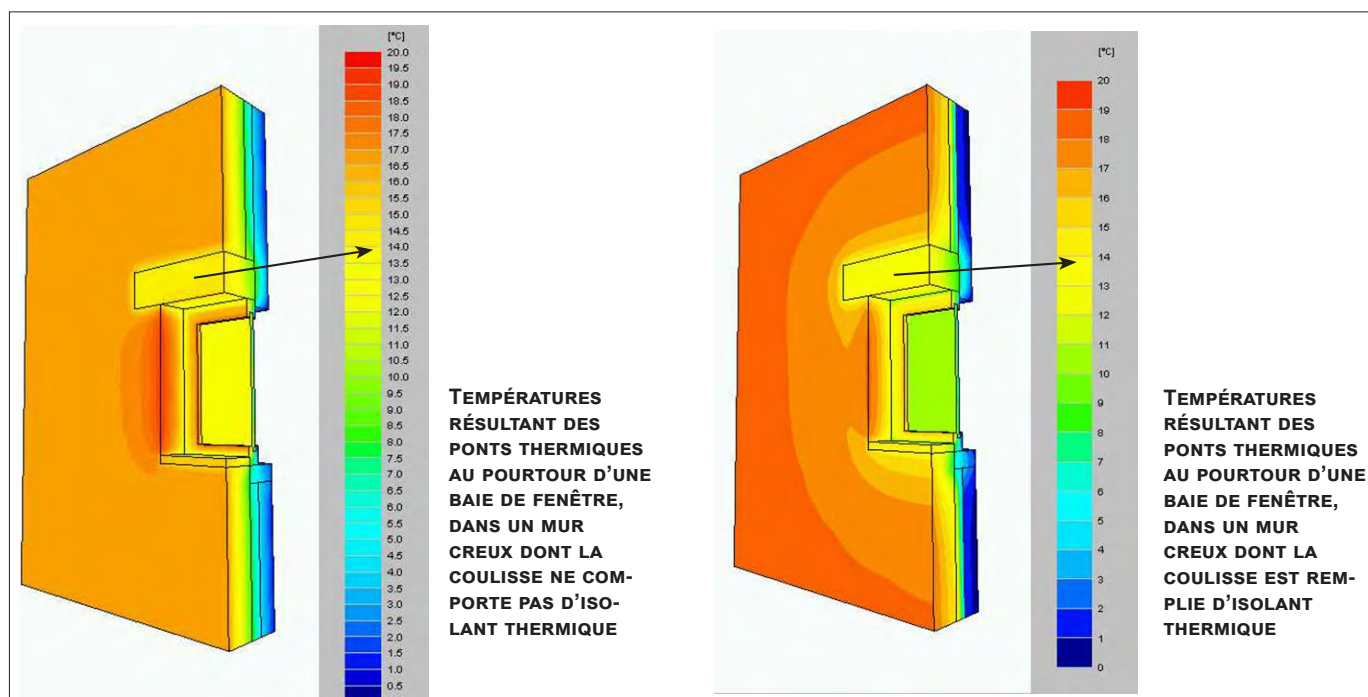
Dans le cas d'un linteau ou d'un seuil directement en contact avec le parement extérieur, le coefficient linéique du pont thermique est de $0,41 \text{ W/mK}$ lorsque la coulisse n'est pas isolée et de $0,82 \text{ W/mK}$ lorsque la coulisse est remplie d'un matériau isolant [HAUG-01] : l'influence du pont thermique est doublée lorsque le mur est isolé.

Par contre, si le linteau est bien séparé du parement par l'isolant qui descend jusqu'au châssis de fenêtre, le "pont thermique" dû au matériau du linteau (béton armé) légèrement plus conducteur que le matériau de la partie structurale du mur (blocs creux de béton mi-lourd) conduit à un coefficient linéique beaucoup plus faible, de $0,13 \text{ W/mK}$, lorsque la coulisse n'est pas isolée et, lorsque la coulisse est isolée, à une valeur négligeable de $0,07 \text{ W/mK}$. Le poids sur les déperditions, des ponts thermiques avérés, s'aggrave donc avec la qualité croissante de la résistance thermique de la paroi où ils sont présents.

L'effet des ponts thermiques se répercute sur les déperditions et, a fortiori, sur les températures internes de paroi qu'ils réduisent localement, températures internes devenant ainsi largement inférieures à la température moyenne générale de la paroi.

Cet effet est illustré par les deux figures reprises ci-dessous résultant d'une simulation au moyen du logiciel Trisco-3D de Physibel. Celle de gauche correspond à un mur creux sans isolation thermique dans le creux du mur, tandis que la coulisse de l'autre figure est remplie d'un matériau isolant.

La figure de gauche fait apparaître une répartition relativement homogène de la température superficielle sur l'ensemble du mur extérieur (environ 17°C), sauf au droit du linteau, où la température chute à 15°C et à l'arête du piédroit intérieur, où les courants de convection favorisent



Il peut y avoir formation de moisissures avant que la condensation n'apparaisse. En effet, l'humidité relative de l'air augmente lorsque la température diminue. Quand l'humidité relative de l'air est trop importante, des problèmes d'hygroscopicité apparaissent à proximité du mur avant que le point de rosée ne soit atteint.

un réchauffement localisé (18°C) : les écarts de température restent au plus de 2 à 3 degrés.

La présence d'une isolation thermique dans la coulisse du mur creux (figure de droite) accentue l'hétérogénéité des flux thermiques et, par là, des températures superficielles. Ainsi, la température de 19°C est atteinte à une certaine distance de la fenêtre, diminuant progressivement jusqu'à 14°C le long du linteau et du seuil : les écarts entre les températures superficielles sont doublés, atteignant 5 à 6 degrés.

Puisque la vapeur d'eau contenue dans l'air d'un local a tendance à se condenser préférentiellement sur les zones où la température superficielle est la plus faible, plus exactement inférieure au point de rosée de la vapeur d'eau, les ponts thermiques génèrent, sur une paroi, des zones où la vapeur d'eau va donc se condenser, de préférence.

Cette condensation superficielle pourrait n'avoir pour seul effet qu'un inconfort localisé : la condensation sur un vitrage simple ne produit que des gouttelettes qui ruissellent sur la vitre, sans autre conséquence, que la nécessité d'évacuer les condensats.

Par contre, lorsque la surface où la condensation se produit propose un milieu nourrissant pour les moisissures (comme l'est la colle de papier peint, par exemple), elle leur permet de s'y développer et de proliférer, constituant ainsi un milieu hygiéniquement peu recommandable pour la santé des occupants.

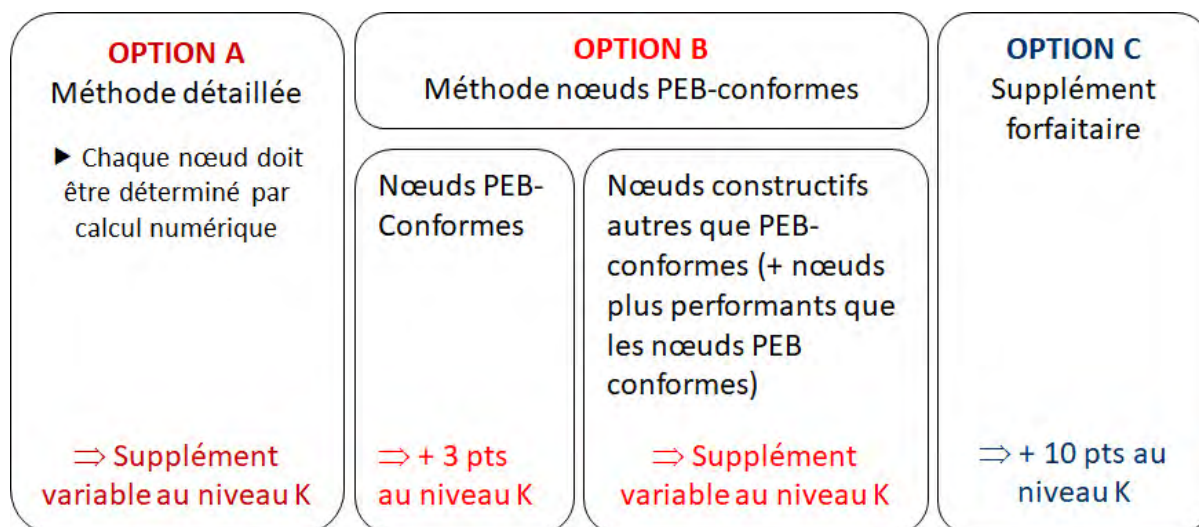
LES NOEUDS CONSTRUCTIFS

Dans le cadre de la PEB, la notion de ponts thermiques est remplacée par une approche plus globale des nœuds constructifs. Le terme nœud constructif couvre l'ensemble des endroits de l'enveloppe du volume protégé où peuvent apparaître des pertes thermiques supplémentaires.

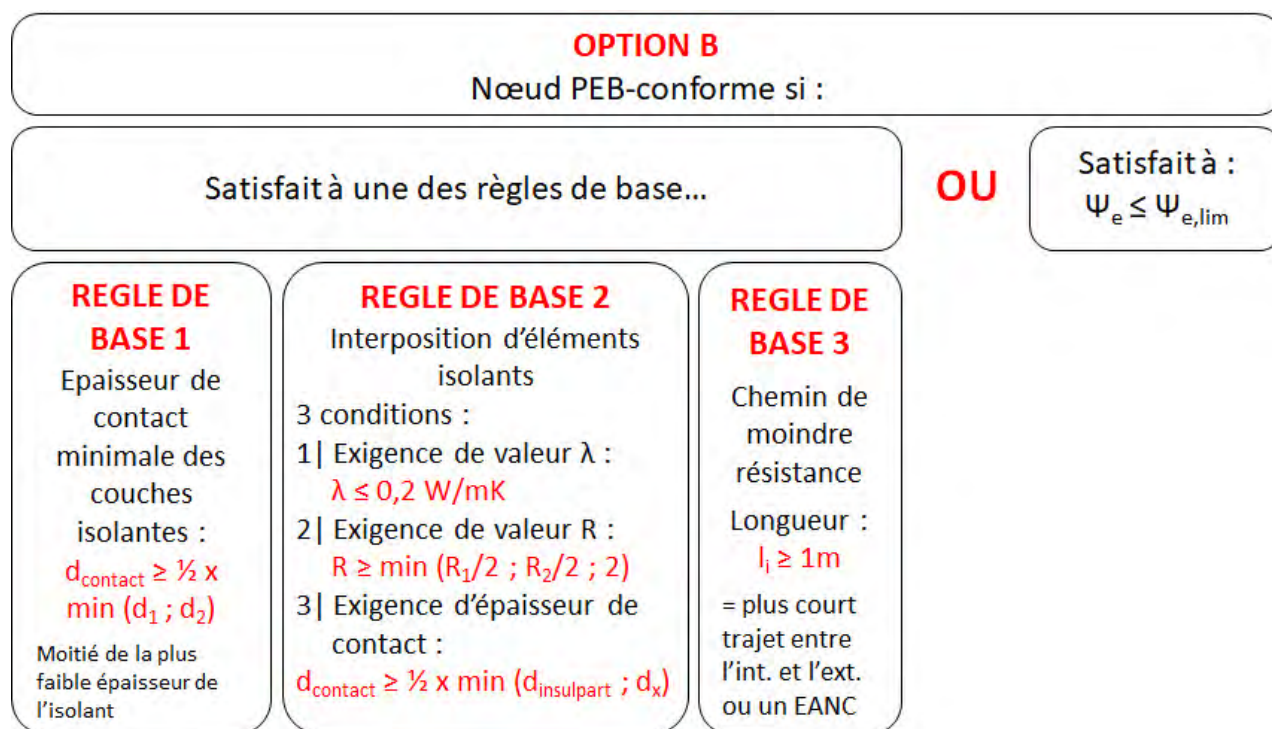
Leur prise en compte ne se fait pas par la valeur U de la paroi mais est répercutée sur le niveau K du bâtiment et sur le niveau E et la consommation spécifique E_{spec} par voie de conséquence.

L'encodage des nœuds constructifs dans le logiciel PEB se fait au niveau du volume protégé, en utilisant une des 3 options suivantes, au choix :

- option A ;
- option B ;
- option C.



Et, pour l'option B, un nœud sera PEB conforme s'il satisfait aux règles explicitées ci-dessous.



Cette méthode permet de simplifier le calcul des ponts thermiques et de « gagner du temps » grâce à une approximation qui a été déterminée dans l'Annexe 1 de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2]. Il y a la possibilité d'encoder les nœuds, dans le logiciel PEB, avec :

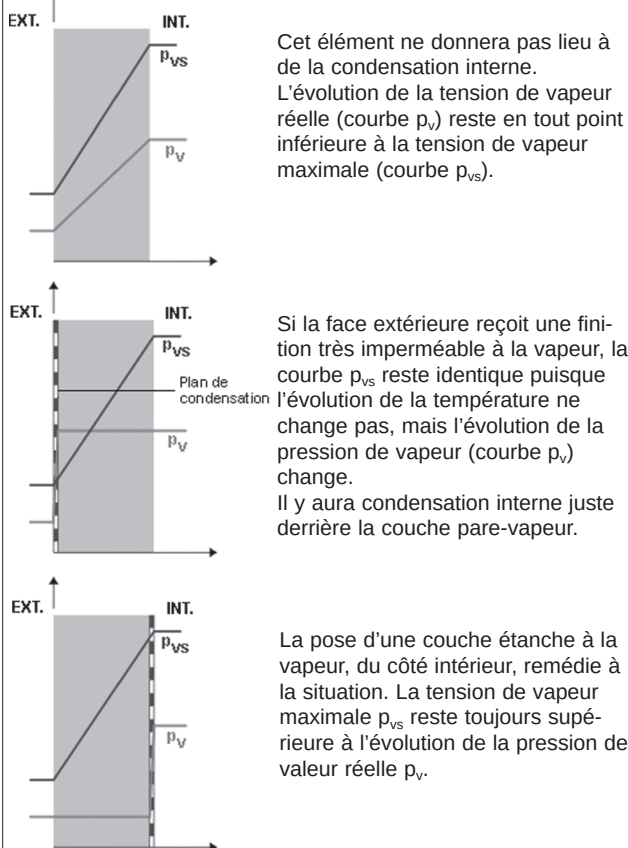
- des valeurs par défaut ;
- des données émanant d'un fabricant, ayant utilisé un logiciel agréé ;
- des résultats de simulations obtenus avec un logiciel agréé.

LE CONTRÔLE DE LA MIGRATION DE VAPEUR AU TRAVERS DE LA PAROI

INFLUENCE DE LA POSITION DU PARE-VAPEUR SUR LA CONDENSATION INTERNE

La présence d'un pare-vapeur d'une paroi la divise en deux zones bien distinctes : celle du côté extérieur du pare-vapeur, qui réagit à la pression de vapeur extérieure ; et celle du côté intérieur du pare-vapeur, qui réagit à la pression de vapeur intérieure. Pratiquement toute la différence de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur se situe donc au droit du pare-vapeur.

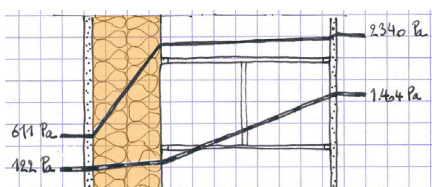
Soit une paroi homogène offrant une certaine résistance thermique.



La couche pare-vapeur doit toujours se trouver du côté chaud de l'élément de construction.

Le **mur plein isolé par l'extérieur** ne présente pas de risque de condensation interne pour autant que la migration de vapeur puisse se faire normalement de l'intérieur vers l'extérieur :

- soit par une finition extérieure perméable à la vapeur tout en étant imperméable à la pluie battante ;
- soit par une lame d'air ventilée entre l'isolant et la finition extérieure ;
- soit dans le cas d'un revêtement extérieur imperméable à la vapeur, en plaçant un pare-vapeur sur la face intérieure du mur ou du côté chaud de l'isolant thermique.



LE PRINCIPE DE LA DIFFUSION DE VAPEUR : RÉSISTANCE DÉGRESSIVE

Dans nos climats tempérés ou froids, la pression de vapeur à l'intérieur des locaux chauffés est presque toujours plus élevée que la pression de vapeur extérieure. La vapeur d'eau a donc tendance à migrer de l'intérieur vers l'extérieur en traversant la paroi.

Ce transfert au travers des matériaux s'opère selon deux modes : la diffusion et la convection.

Il est important d'éviter que cette vapeur d'eau se condense, en trop grande quantité et d'une façon trop répétée, en une partie froide de la paroi : les matériaux pourraient se dégrader par l'apparition de champignons, de moisissures, de corrosions ou d'éclatement à cause du gel.

Ainsi, un complément parfois indispensable de l'isolation thermique est un écran résistant à la diffusion de vapeur d'eau. Cet "écran" est appelé pare-vapeur.

Il est en général préférable que les matériaux constituant les parois soient perméables à la vapeur d'eau, avec une dégressivité de la résistance au passage de cette vapeur, depuis l'intérieur vers l'extérieur. En effet, il est impératif que la vapeur d'eau puisse sortir plus rapidement du mur qu'elle n'y rentre.

- **Côté intérieur** : les finitions intérieures sont choisies en fonction de leur résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Au besoin, des films "pare-vapeur" sont interposés pour augmenter cette résistance.
- **Côté extérieur** : les parements et finitions extérieurs doivent offrir une grande perméabilité à la diffusion de vapeur d'eau. Si ce n'est pas le cas :
 - pour une paroi verticale : on interpose une lame de ventilation et de drainage entre la finition extérieure et la paroi ;
 - pour une toiture inclinée : sous la couverture, il faut également interposer une lame de ventilation et de drainage ;
 - pour une toiture plate : l'étanchéité est un matériau très imperméable à la vapeur d'eau, situé du côté le plus froid de la paroi. Dans ce cas, on arrête le flux de vapeur par un pare-vapeur (dont la valeur μ_d ou S_d est plus grande que celle de l'étanchéité de la toiture), posé de manière parfaitement continue du côté intérieur de la couche isolante.

Le tableau ci-après situe la valeur de S_d (ou μ_d) de quelques matériaux, répartis en classes de pare-vapeur E1 à E4, avec les précautions de pose requises.

L'ENVELOPPE ET L'HYGROTHERMIE

MATÉRIAUX LE PLUS COURAMMENT UTILISÉS COMME BARRIÈRE D'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR ET À LA VAPEUR EN FONCTION DE LA RÉSISTANCE MOYENNE À LA DIFFUSION DE VAPEUR (AVEC LES VALEURS INDICATIVES DE S_d [CSTC-14])

TYPES DE MATÉRIAUX	VALEUR $S_{d,eq} = \mu \cdot d_{eq}$ ⁽¹⁾
Classe E1 - Matériaux faiblement imperméables à la vapeur	$2 \text{ m} < S_d \leq 5 \text{ m}$
Film à base de papier	3-5 m ($> 0,8 \text{ m}$) ⁽²⁾
Feuille à base de polyamide	5 m ($> 0,2 \text{ m}$) ⁽²⁾
Classe E2 - Matériaux relativement à la vapeur ⁽³⁾	$5 \text{ m} < S_d \leq 25 \text{ m}$
Voile de polypropylène	8 m ⁽²⁾
Film de polyéthylène ($\geq 0,15 \text{ mm}$, posé, y compris perforations par les agrafes)	5 à 25 m
Fibres de polyéthylène non tissées	5 à 10 m
Classe E3 - Matériaux capables de freiner fortement la vapeur ⁽⁴⁾	$25 \text{ m} < S_d \leq 200 \text{ m}$
Feuille d'aluminium sur supports divers	150 m
Bitume polymère (joints étanches) ⁽⁵⁾	25 à 200 m
Classe E4 - Matériaux étanche à la vapeur ⁽⁴⁾	$200 \text{ m} < S_d$
Membrane bitumineuse renforcée d'une armature d'aluminium (Alu 3)	$> 250 \text{ m}$

⁽¹⁾ Les études hygrothermiques sont effectuées en tenant compte de la valeur exacte de la résistance à la diffusion de vapeur des matériaux et de l'influence de la pose dans la paroi (fixations, joints, jonctions des bords, etc.). On prend en compte cette influence en calculant la valeur $S_{d,eq}$, c'est-à-dire la résistance équivalente à la diffusion de vapeur. Il y a lieu de demander cette valeur au fabricant pour chaque produit. S'il ne peut fournir que la valeur S_d (résistance à la diffusion de vapeur du produit déterminée en laboratoire, sans tenir compte de l'influence de la pose), il faut bien garder à l'esprit que la résistance à la diffusion de vapeur équivalente du produit après la pose ($S_{d,eq}$) pourra être inférieure à la valeur théorique. La mise en oeuvre d'une barrière d'étanchéité à l'air et à la vapeur dans une paroi doit s'effectuer de telle sorte que les joints entre les lés ou les panneaux et les raccords avec les autres éléments de construction soient soigneusement obturés (collage ou soudage). En d'autres termes, la paroi doit être parfaitement étanche à l'air (classe L1 ou mieux selon la classification au CSTC utilisée dans les toitures). En outre, les barrières d'étanchéité à l'air et à la vapeur de classe E3 et E4 doivent être posées sur un support continu (panneaux à base de bois, par exemple) ; les perforations (vis ou autres) ne sont pas autorisées dans les pare-vapeur de classe E4. Si ces prescriptions sont respectées, on peut supposer, dans le cas d'un pare-vapeur de classe E1 ou E2, que la résistance équivalente à la diffusion de vapeur sera relativement proche de la résistance théorique ($S_{d,eq} = S_d$). Dans le cas où la barrière à l'air et à la vapeur offre une grande résistance à la diffusion de vapeur (classe E3 ou mieux), il se peut que la différence entre la valeur réelle et la valeur théorique soit relativement importante. Il est dès lors recommandé d'avoir recours à des membranes d'attente, de tenir compte de la valeur S_d de la bande d'étanchéité à l'air choisie et de bien obturer tous les raccords de manière à ce qu'ils soient parfaitement étanches.

⁽²⁾ Pour les matériaux dont la vapeur μ dépend de l'humidité relative de l'air (HR), on mentionne une valeur moyenne (pour une humidité relative d'environ 50 %) et une valeur minimum (pour une humidité relative d'environ 90 %).

⁽³⁾ La gamme de produits actuellement disponibles pour une application comme pare-vapeur est très étendue et évolue constamment.

⁽⁴⁾ Cette classe de matériau permet d'atteindre des performances élevées si la pose est effectuée sur un support continu.

⁽⁵⁾ Comme pare-vapeur de classe E3, on peut utiliser une membrane bitumineuse de 3 ou 4 mm d'épaisseur. Nous opterions plutôt pour des membranes renforcées d'une armature en polyester et non pour des membranes avec une armature en voile de verre, qui peuvent se déchirer beaucoup plus rapidement (en fonction de l'exposition). L'utilisation du bitume polymère est peu courante dans les parois verticales.

Dans le cadre de la PEB, le transfert de la vapeur d'eau n'est pas pris en compte.

Il appartient dès lors à l'auteur de projet de vérifier que la migration de la vapeur d'eau au travers de la paroi ne génère pas un problème de condensation interne éventuellement dommageable aux matériaux qui constituent la paroi.

LA PARTICIPATION DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE À L'INERTIE THERMIQUE

La notion de confort est directement liée à l'isolation thermique mais dépend également très fortement de l'inertie thermique.

L'INERTIE THERMIQUE : PRINCIPE ET DÉFINITION

LE PRINCIPE

Le terme "inertie thermique", quoique manquant de définition précise, évoque bien le comportement des immeubles soumis à un régime thermique variable. Un régime est variable quand les flux de chaleur sont variables.

Cette variabilité, qu'on rencontre dans tous les cas, résulte des fluctuations suivantes :

- de la température extérieure (au cours de la journée, par exemple) ;
- de la température intérieure (suite à l'ouverture ou fermeture des fenêtres au cours de la journée, par exemple) ;
- de la température de consigne intérieure ;
- des apports internes (périodes de cuisson ou de lavage, par exemple) ;
- de l'ensoleillement (variation jour-nuit et position du soleil, périodes de nébulosité passagère).

Pour faciliter l'approche du régime variable, on peut interpréter les fluctuations des flux de chaleur atteignant l'immeuble comme étant des oscillations diurnes autour d'un état moyen plus ou moins stationnaire (car il existe aussi des variations de jour en jour).

L'inertie thermique influence la réaction de l'intérieur de l'immeuble aux oscillations du flux de chaleur autour de sa moyenne diurne ou décadaire :

- plus l'inertie thermique est forte, plus la température interne restera proche de l'état stationnaire déterminé par cette moyenne ;
- plus l'inertie thermique est faible, plus la température interne variera avec les variations des flux.

DE QUOI DÉPEND L'INERTIE THERMIQUE ?

L'inertie thermique dépend de la constitution de l'enveloppe et de la masse des planchers et des murs intérieurs qui se trouvent plus ou moins en contact direct avec l'air intérieur.

Les revêtements minces en PVC ou les carrelages n'empêchent pratiquement pas ce contact, car ils n'ont pas une capacité d'isolation thermique.

En revanche, à cause de leur capacité d'isolation, une moquette épaisse ou un faux-plafond limitera le flux entre l'ambiance intérieure et les murs ou le plancher.

LA CAPACITÉ THERMIQUE

Elle est définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température d'un mètre cube de matériau. Elle est le produit de la chaleur spécifique C [J/kgK] du matériau et de sa densité (ρ en [kg/m³]).

LA VITESSE D'AVANCEMENT DU "FRONT DE CHALEUR" OU DIFFUSIVITÉ THERMIQUE

Elle correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau (unité : m²/h) et peut se définir par la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. Elle est directement proportionnelle à sa conductivité thermique et inversement proportionnelle à sa chaleur volumique.

On obtient sa valeur par :

$$\text{diffusivité thermique} = \lambda / (\rho \times C) \text{ [Wm}^2\text{/J]}$$

où λ = conductivité thermique du matériau [W/m K]
 ρ = masse volumique du matériau [kg/m³]
 C = chaleur spécifique du matériau [J/kgK]

L'INERTIE DE TRANSMISSION ET L'INERTIE D'ABSORPTION

Pour plus de précisions, il convient de parler en fait de deux phénomènes d'inertie : l'inertie de transmission et l'inertie d'absorption.

• L'inertie de transmission

Elle décrit dans quelle mesure une paroi de l'enveloppe diminue l'amplitude d'une oscillation de la température extérieure et la retarde (déphasage) dans sa transmission vers l'intérieur.

Cette inertie dépend principalement de la valeur de la diffusivité $\lambda / \rho C$ du matériau de la paroi et de son épaisseur, sachant que :

- λ est la conductivité thermique (en W/mK) ;
- ρC est la chaleur volumique ou capacité de chaleur spécifique volumique (en J/m³K). C'est le produit de la masse volumique ρ (kg/m³) par la chaleur spécifique C (J/kgK).

La plupart des matériaux de construction ont des diffusivités voisines de $4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Le bois et ses dérivés ont une diffusivité proche de $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Les isolants courants ont une diffusivité de 20 à $40 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

L'inertie de transmission augmente avec l'épaisseur et diminue avec la diffusivité de la paroi.

Les parois opaques d'une épaisseur supérieure à 100 mm peuvent être considérées comme inertes du point de vue de la transmission de l'oscillation diurne.

Une situation intéressante est obtenue avec une épaisseur proche de 300 mm, car alors la transmission atténuée de l'oscillation extérieure est retardée de 12 heures et les crêtes du flux de midi n'apparaissent à l'intérieur qu'à minuit.

• L'inertie d'absorption

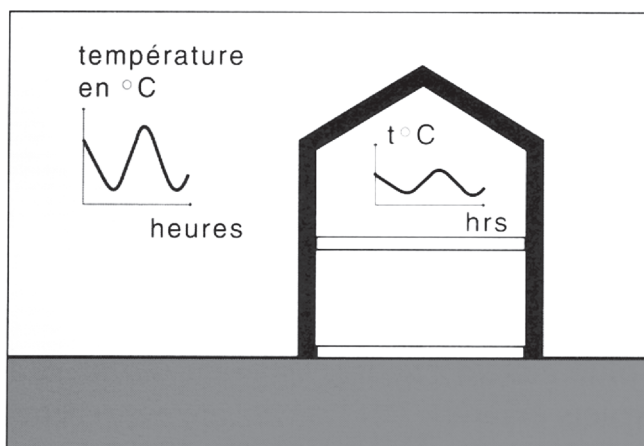
Elle décrit comment la température de la face d'une paroi intérieure, en contact avec l'air du local, réagit à une oscillation du flux de chaleur intérieur.

Plus la paroi est inerte, plus l'oscillation de la température de cette face est faible. Cette inertie dépend de la valeur de l'effusivité de la paroi $(\lambda \times \rho C)^{1/2}$ du matériau et de l'épaisseur de paroi disponible par rapport aux espaces qui la jouxtent ; ainsi un plancher séparant deux locaux ne compte dans chaque local que pour sa demi-épaisseur.

L'effusivité est du même ordre de grandeur :

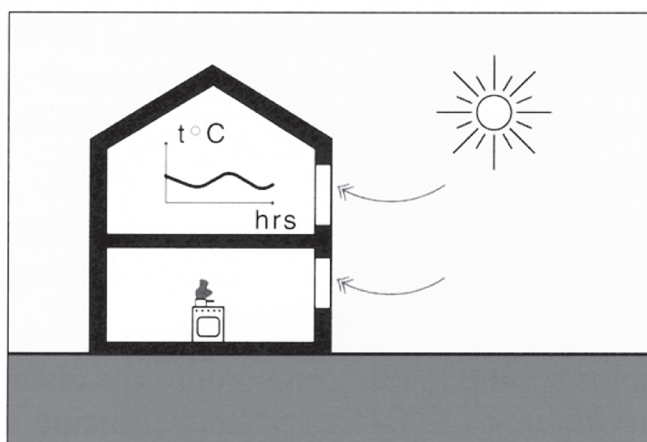
- pour la plupart des matériaux de construction en maçonnerie : $2.000 \text{ J/m}^2\text{Ks}^{1/2}$;
- pour le bois et ses dérivés : environ $400 \text{ J/m}^2\text{Ks}^{1/2}$;
- pour les isolants thermiques : $40 \text{ J/m}^2\text{Ks}^{1/2}$.

L'inertie d'absorption augmente avec l'épaisseur et avec l'effusivité de la paroi. Ainsi les parois inertes du point de vue de l'absorption sont celles en béton et maçonneries lourdes d'une épaisseur disponible supérieure à 50 mm. Elles atteindront le maximum de leur efficacité dans l'atténuation de l'effet d'une oscillation diurne avec une



L'INERTIE DE TRANSMISSION [BERN-97]

L'enveloppe opaque transmet une oscillation de la température extérieure avec une amplitude diminuée et avec un retard.



L'INERTIE D'ABSORPTION [BERN-97]

Elle diminue et retarde l'oscillation de la température intérieure résultant de l'oscillation de tous les flux entrants et des apports internes.

épaisseur disponible de l'ordre de 100 mm.

La distinction entre l'inertie de transmission et celle d'absorption est importante, car une grande partie des flux de chaleur affecte l'intérieur d'un bâtiment, non pas par l'enveloppe opaque mais directement par les ouvertures ou les bouches de ventilation, et surtout à travers les parois vitrées quand elles sont ensoleillées.

A ces flux, il faut ajouter les apports internes (cuisson, éclairage, lavages, appareils).

L'atténuation des oscillations de tous ces flux est due principalement à l'inertie thermique.

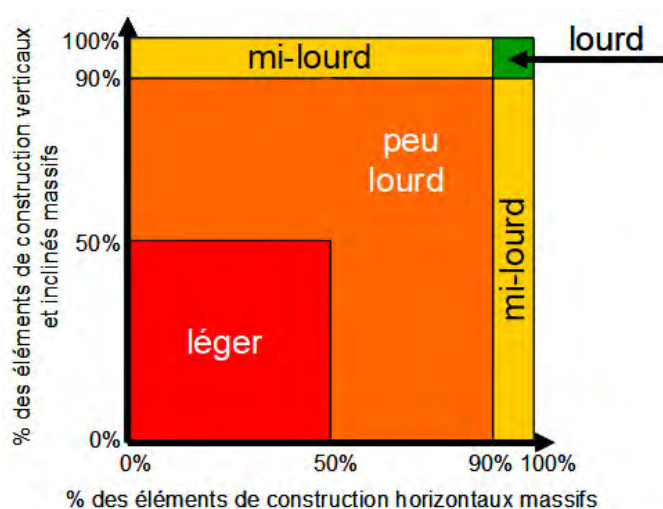
L'APPROCHE SIMPLIFIÉE, DANS LE CADRE DE LA PEB

L'inertie thermique ou capacité thermique effective caractérise chaque secteur énergétique d'un bâtiment.

Dans le cadre de la PEB, elle se définit en 4 classes :

- **Lourd** = secteur énergétique dont au moins 90 % de la surface des éléments de construction horizontaux, inclinés ET verticaux sont massifs.
- **Mi-lourd** = secteur énergétique dont au moins 90 % des éléments de construction horizontaux sont massifs sans être protégés par une isolation intérieure OU secteur énergétique dont au moins 90 % des éléments de construction verticaux et inclinés sont massifs.
- **Peu lourd** = secteur énergétique dont 50 à 90 % des éléments de construction horizontaux sont massifs sans être protégés par une isolation intérieure OU secteur énergétique dont 50 à 90 % des éléments de construction verticaux et inclinés sont massifs.
- **Léger** = tout autre secteur énergétique.

Un élément de construction est considéré comme **MASSIF** si sa masse est d'au moins 100 kg/m², en ne considérant que les couches situées entre l'intérieur et une lame d'air ou une couche de valeur λ (conductivité thermique) inférieure à 0,20 W/mK.



Toujours dans le cadre de la PEB, l'inertie intervient pour le calcul de la surchauffe. Au plus la masse thermique est inaccessible, au plus la surchauffe est susceptible d'apparaître. Si aucune mesure de refroidissement active n'est prise, une quantité fictive d'énergie pour refroidir le bâtiment est comptabilisée dans le calcul des déperditions ; cette quantité fictive est directement proportionnelle à la probabilité de surchauffe calculée par le logiciel.

LES EFFETS DE L'INERTIE

D'une manière générale, l'inertie forte permet de :

- réduire les surchauffes en été, ce qui permet d'éviter ou de diminuer les besoins de refroidissement ;
- bénéficier des apports solaires en hiver, surtout dans le cas d'un usage continu (logement, hôpital).

L'inertie faible, en revanche, couplée à une bonne programmation, procure des économies d'énergie dans le cas d'un usage intermittent.

Les quelques exemples qui suivent [BERN-97] vont illustrer et expliciter les effets de l'inertie, en hiver et en été.

EXEMPLE 1 : HIVER - JOURNÉE FROIDE - CHAUFFAGE (OCCUPATION PERMANENTE)

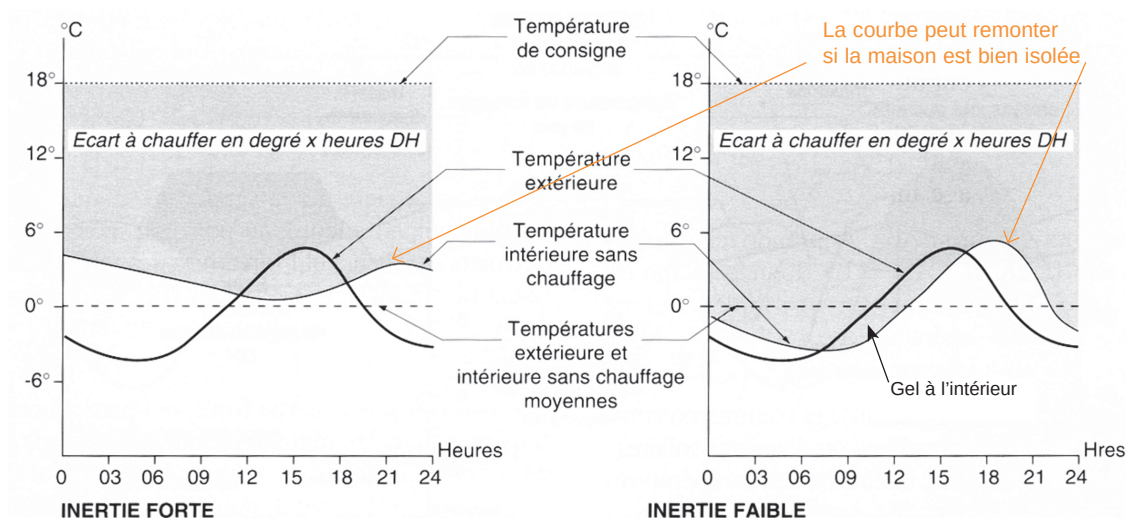
Avec cet exemple ci-dessous relatif au chauffage d'un bâtiment occupé en permanence, on constate qu'en absence de chauffage ou d'apports solaires :

- en cas d'inertie faible, la courbe des températures intérieures suit de près celle des températures extérieures, en amplitude et dans le temps ;
- en cas d'inertie forte, la courbe des températures intérieures est décalée dans le temps et son amplitude diminuée. La température intérieure se rapproche de la moyenne des températures extérieures.

Notons que les surfaces grisées indiquent l'écart des températures intérieures par rapport à la température de confort ou de consigne éventuelle de 18°C.

Les unités de mesure de ces surfaces sont des degrés-heures (°C x H ou DH), car les ordonnées et les abscisses sont respectivement en degrés et en heure. Cet écart doit être "comblé" par le chauffage.

Dans cet exemple ("hiver - journée froide"), les surfaces grisées sont fort semblables dans les deux cas d'inertie (forte et faible).



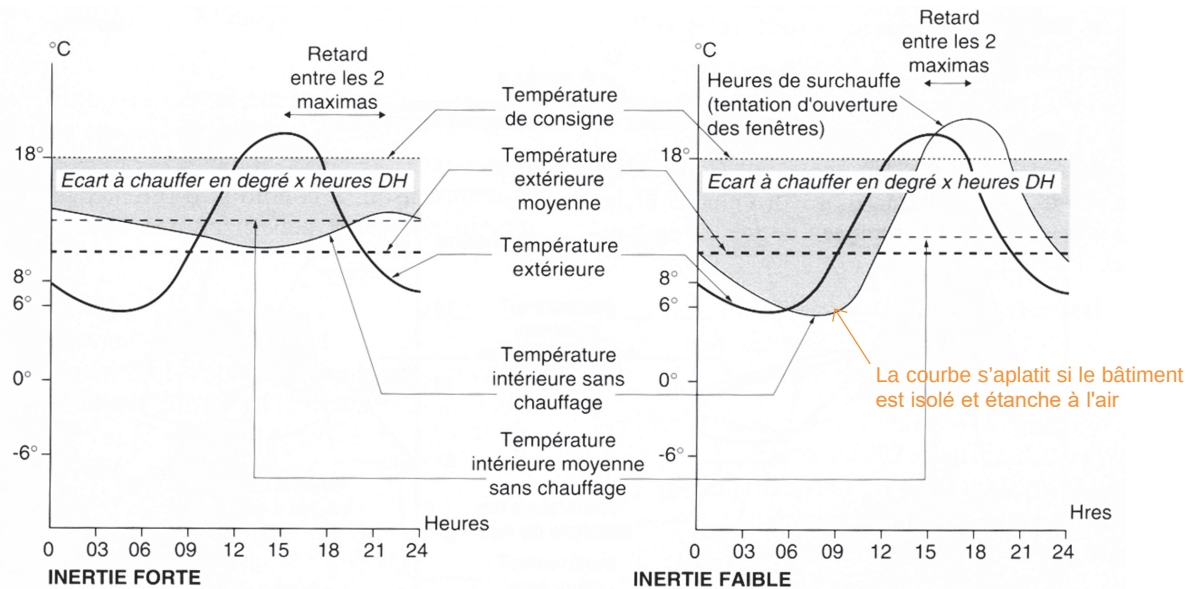
EXEMPLE 2 : PRINTEMPS - JOURNÉE MOINS FROIDE ET ENSOLEILLÉE - CHAUFFAGE (OCCUPATION PERMANENTE)

Dans cet exemple ("printemps - journée moins froide et ensoleillée"), la surface grisée du diagramme de l'inertie forte est plus petite car, dans le cas d'une inertie forte, la chaleur des heures chaudes de la journée, y compris les apports solaires et internes (cuisson, par exemple), est emmagasinée dans les masses intérieures de la construction (inertie d'absorption) pour être restituée aux heures froides de la nuit. Il y a donc économie de chauffage, lors des jours ensoleillés ou en mi-saison, pour le bâtiment à forte inertie.

Ce processus est très important en été également, car il réduit considérablement la probabilité de surchauffe (exemple 1 et exemple 2 "inertie forte").

L'apport solaire est emmagasiné dans les masses sans causer de surchauffe, puis restitué la nuit.

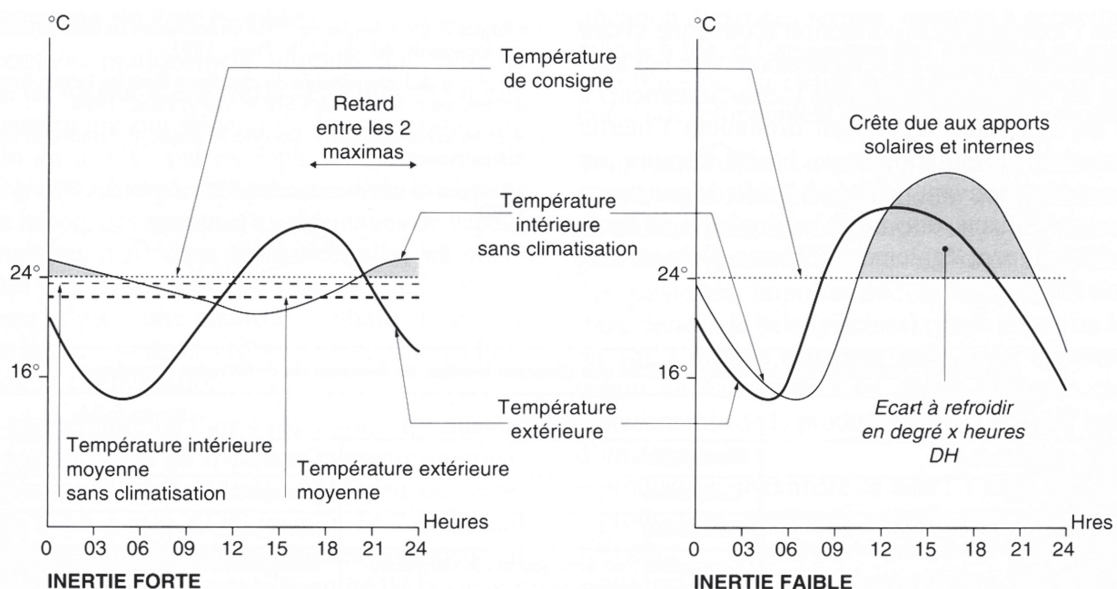
Dans le cas d'une inertie faible, on atteint, lors des jours ensoleillés de l'hiver ou à la mi-saison (exemple 2 "inertie faible"), une surchauffe provoquant l'ouverture des fenêtres. La chaleur n'est pas emmagasinée pour la nuit.



EXEMPLE 3 : ETÉ - JOURNÉE ENSOLEILLÉE - FENÊTRES OUVERTES

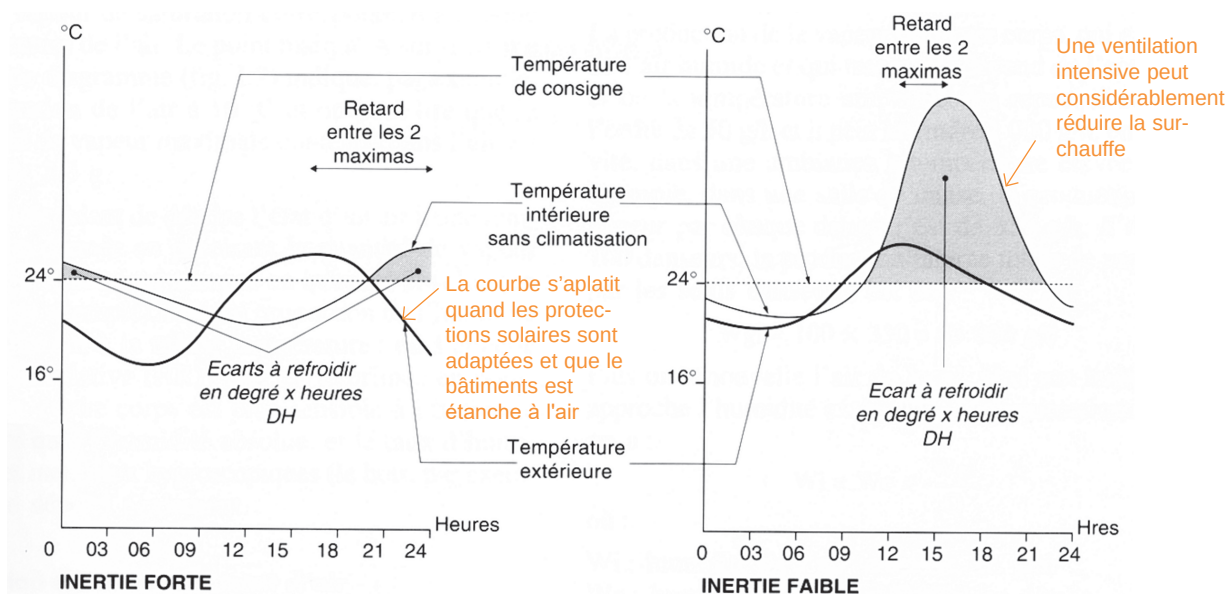
L'été, le problème de la surchauffe risque de devenir plus gênant encore, au point où même l'emploi de volets extérieurs et l'ouverture des fenêtres ne suffisent plus à dissiper la chaleur (exemple 3 "journée ensoleillée - fenêtres ouvertes, inertie faible").

Les avantages de l'inertie forte sont particulièrement sensibles dans les régions méridionales, dans le cas de grandes surfaces de vitrages orientées au sud, à l'ouest et à l'est.



EXEMPLE 4 : ETÉ - JOURNÉE ENSOLEILLÉE - FENÊTRES FERMÉES

Quand, pour diverses raisons (protection contre le bruit, grandes verrières, immeuble de grande hauteur), il n'est pas possible d'ouvrir les surfaces vitrées ainsi orientées ou de les occulter, la climatisation devient obligatoire, hiver comme été (exemple 4 "journée ensoleillée - fenêtres fermées").



En résumé : avec une *inertie forte*, on peut prévoir des économies d'énergie en été. Si l'usage est continu, on peut également obtenir des économies en hiver et en demi-saison, à condition d'orienter les vitrages vers le sud pour bénéficier des apports hivernaux. Avec une *inertie faible*, la température intérieure sans chauffage augmente en été mais peut également diminuer considérablement en hiver, descendant sous le zéro.

LA POSITION DE L'ISOLANT THERMIQUE DANS LA PAROI

La position de la couche isolante dans la paroi n'influence pas la résistance thermique de celle-ci.

Elle joue par contre, un rôle non négligeable sur les performances en termes d'inertie thermique, d'effusivité thermique des surfaces intérieures des parois extérieures et sur la problématique des ponts thermiques.

Pour un bâtiment, les quatre solutions possibles sont :

- isolation par l'extérieur ;
- isolation répartie ou entre deux parois ;
- isolation par l'intérieur ;
- isolation dans une paroi composée ;
- isolation mixte suivant les parois.

Le tableau ci-dessous aborde les avantages et inconvénients de ces différentes solutions.

CRITÈRES	ISOLATION EXTÉRIEURE Cas d'une peau extérieure légère (crépi, bardage...)	ISOLATION RÉPARTIE OU ENTRE DEUX COUCHES Cas des panneaux sandwichs ou des murs creux	ISOLATION INTÉRIEURE Assez rare en nouvelle construction. Nécessite une finition intérieure notamment pour la durabilité
INERTIE THERMIQUE	😊 L'intérieur bénéficie de la capacité d'accumulation de chaleur des parois lourdes.	😊 L'intérieur bénéficie de la capacité d'accumulation de chaleur des parois lourdes.	😞 L'inertie thermique du mur n'est pas mobilisable pour améliorer le confort intérieur.
PONTS THERMIQUES	😐 Ponts thermiques quasi inexistant (sauf vers les fondations et aux seuils de portes).	😐 L'isolation intérieure est intéressante dans de nombreux cas mais nécessite des détails particuliers pour éviter certains ponts thermiques.	😞 Il est difficile d'éviter les ponts thermiques.
PROTECTION CONTRE LA PLUIE BATTANTE	😊 Sous peine de détériorer l'isolant, une peau extérieure doit assurer une bonne protection contre la pluie battante.	😐 Les problèmes de pénétration de pluie battante doivent être résolus.	😐 Il faut que la paroi extérieure ne permette pas à l'eau d'atteindre l'isolant.
PROTECTION CONTRE LES ÉCARTS DE TEMPÉRATURES ET LE GEL	😊 L'isolation extérieure protège la paroi extérieure du gel et des écarts de température trop importants.	😐 Selon la composition et la perméabilité de la paroi.	😞 La paroi extérieure est sujette à des écarts de température augmentant ainsi le risque d'apparition de fissures.
SÉCHAGE DU MUR EXTÉRIEUR	😊 La température du mur reste constante tout au long de l'année et, de plus, le mur est protégé des pluies.	😐 Dépend essentiellement du type de mur, de son orientation et de la ventilation de celui-ci.	😞 Le mur devient plus froid en hiver ; son séchage devient moins rapide et l'humidité ext. pénètre plus profondément.
HUMIDITÉ	😐 La vapeur d'eau doit pouvoir migrer de l'intérieur vers l'extérieur au travers du revêtement extérieur. Si la peau extérieure ne le permet pas : il faut alors veiller à une bonne ventilation et poser un pare-vapeur du côté intérieur de l'isolant.	😐 La vapeur d'eau doit pouvoir migrer de l'intérieur vers l'extérieur au travers du revêtement extérieur. Si la peau extérieure ne le permet pas : il faut alors veiller à une bonne ventilation et poser un pare-vapeur du côté intérieur de l'isolant.	😞 Il y a un risque de formation de condensation à l'interface entre le mur et l'isolant ; il faut prévoir un pare-vapeur efficace, à poser du côté intérieure de l'isolant.
DÉGRADATION DU PAREMENT (OU PEAU) EXTÉRIEUR	😐 Il est toujours nécessaire de mettre en œuvre une peau extérieure (crépi ou bardage, par exemple).	😐 Le parement extérieur devant humide, il peut se dégrader. Si l'isolant n'est pas suffisamment protégé, il peut se remplir d'eau et ne plus être efficace. Ceci peut entraîner la dégradation de toute la paroi.	😞 Le séchage du mur extérieur étant moins rapide, le parement extérieur devient plus humide et peut se dégrader.
CONTRAINTES LIÉES À LA POSITION DE L'ISOLANT ET DURABILITÉ	😐 Il est nécessaire d'apposer une peau extérieure devant l'isolant car, non protégé, il est sensible à toutes sortes de dégradation.	😐 Si toutes les conditions (eau, humidité...) sont bien étudiées, cette solution est la plus durable et celle qui est la plus neutre d'un point de vue esthétique.	😐 Il est nécessaire d'apposer une peau intérieure sur l'isolant car, non protégé, il est sensible à toutes sortes de dégradation.
COÛT DE RÉALISATION ET DE MAINTENANCE	😐 La peau extérieure peut nécessiter un entretien régulier. L'entretien dépend de la nature et de la texture du matériau extérieur.	😐 Technique la plus répandue (mur creux). L'entretien dépend de la texture du matériau extérieur.	😊 Pour autant que la finition (et la zone d'équipement) soit bien réalisée, ne nécessite que peu d'entretien de la peau intérieure.

CRITÈRES	ISOLATION DANS UNE PAROI COMPOSÉE (Ossature bois, ossature métallique, chevrons de toiture, etc.)		ISOLATION MIXTE Assez rare en nouvelle construction mais est parfois nécessaire dans des détails particuliers	
INERTIE THERMIQUE	☹️	L'inertie thermique des murs est faible ; il est intéressant de créer des parois intérieures lourdes.	☹️	L'inertie des parois dont l'isolation est intérieure n'est pas mobilisable.
PONTS THERMIQUES	☹️ 😊	Dans les structure composée avec du bois, les ponts thermiques sont négligeables. Dans les ossatures métalliques, il faut plus vigilant à la section utilisée de la structure.	☹️	Il faut faire attention à bien neutraliser le pont thermique à la jonction des deux types d'isolation.
PROTECTION CONTRE LA PLUIE BATTANTE	☹️	Sous peine de détériorer la paroi composée e.a. d'isolant, une peau extérieure rapportée doit assurer une bonne protection contre la pluie battante.	☹️	Il faut empêcher toute pénétration de pluie battante.
PROTECTION CONTRE LES ÉCARTS DE TEMPÉRATURES ET LE GEL	😊	L'isolation étant répartie dans l'épaisseur de la paroi, les écarts de température n'influencent que très faiblement le comportement de la paroi.	☹️	Les parois dont l'isolation est intérieure sont sujettes à des écarts de températures.
SÉCHAGE DU MUR EXTÉRIEUR	😊	La température du mur reste constante tout au long de l'année et, de plus, le mur est protégé des pluies.	☹️	Les parois dont l'isolation est intérieure ont un séchage moins rapide que les autres.
HUMIDITÉ	☹️	La vapeur d'eau doit pouvoir migrer de l'intérieur vers l'extérieur au travers du revêtement extérieur. Si la peau extérieure ne le permet pas, il faut veiller à une bonne ventilation et la pose d'un pare-vapeur du côté intérieur de l'isolant.	☹️	Il y a un risque de formation de condensation à l'interface entre le mur et l'isolant ; il faut prévoir un pare-vapeur efficace.
DÉGRADATION DU PAREMENT (OU PEAU) EXTÉRIEUR	☹️	Il est toujours nécessaire de mettre en œuvre une peau extérieure (crépis, bardage, etc.)	☹️	Il y a un risque de dégradation du parement extérieur aux endroits où l'isolation est intérieure.
CONTRAINTES LIÉES À LA POSITION DE L'ISOLANT ET DURABILITÉ	☹️	Il est nécessaire de placer une peau extérieure sur la structure composée, car non protégée, elle est sensible à toutes sortes de dégradations.	☹️	Le changement de position de l'isolant dans un même espace est parfois difficile à gérer d'un point de vue esthétique.
COÛT DE RÉALISATION ET DE MAINTENANCE	☹️	L'avantage financier réside principalement dans la préfabrication avancée de ces parois et par le fait que la structure et l'isolation sont réparties dans la même couche.	☹️	Selon la position et l'orientation (voir colonne spécifique).

LES PRINCIPES ET OUTILS DE CONCEPTION

LA FORME GLOBALE DE L'ENVELOPPE.....	50
LE CONTEXTE.....	50
<i>Le macroclimat.....</i>	50
<i>Le microclimat.....</i>	51
LE PROGRAMME ARCHITECTURAL.....	54
<i>Le zonage des activités et la thermique passive.....</i>	54
LA COMPACITÉ ET LA DENSITÉ DU BÂTI.....	55
<i>La cohérence entre les technologies d'enveloppe.....</i>	55
<i>La continuité de l'isolation thermique dans la paroi, combinée ou non à un pare-vapeur.....</i>	56
LES RELATIONS STRUCTURE / ENVELOPPE.....	60
LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE.....	61
LA VALEUR U DES PAROIS.....	63
LA VALEUR DU NIVEAU D'ISOLATION THERMIQUE GLOBALE K DE L'UNITÉ PEB.....	63
LE NIVEAU E_w DE L'UNITÉ PEB.....	64
<i>Le niveau E_w d'une unité PER (logement individuel).....</i>	64
<i>Le niveau E_w d'une unité PEN (unités non résidentielles et logements collectifs).....</i>	64
LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE SPÉCIFIQUE E_{SPEC}	67
L'OBLIGATION DE VENTILER L'UNITÉ PEB.....	67
L'INDICE DE SURCHAUFFE.....	68
LES SYSTÈMES.....	70
LES ÉTAPES DE CONCEPTION.....	71
ORGANIGRAMME.....	72

LA FORME GLOBALE DE L'ENVELOPPE

LE CONTEXTE

Le comportement d'une enveloppe extérieure face aux conditions climatiques d'un lieu peut se résumer par :

- s'ouvrir aux avantages ;
- se protéger des contraintes.

LE MACROCLIMAT

Pour analyser le climat d'un site, il faut exprimer, de manière quantifiable, les facteurs climatiques qui sont :

- la position du soleil ;
- l'éclairement du soleil ;
- la température ;

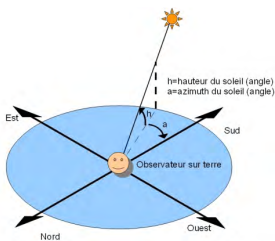
MESURES DES DONNÉES CLIMATIQUES EN BELGIQUE

Dans notre pays, plusieurs stations météorologiques permettent d'obtenir des valeurs moyennes pour chaque région. Les mesures enregistrées par les stations sont influencées par le microclimat du site dans lequel elles se situent (topographie, végétation, nature du sol, construction, etc.).

Ces mesures diffèrent donc de celles que l'on enregistrerait sur un autre site ; ainsi l'auteur de projet interprètera les mesures régionales en fonction du lieu dans lequel il construit afin de définir le microclimat du site considéré.

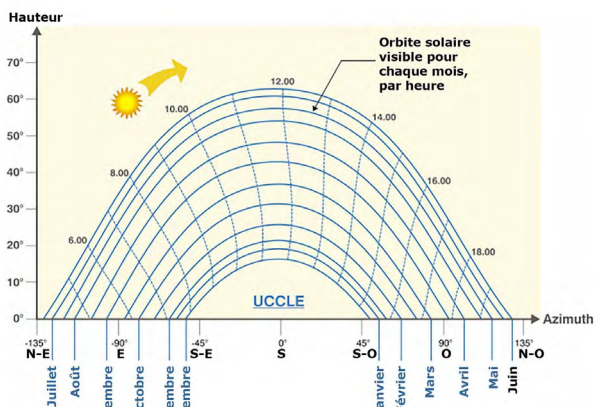
Ceci se vérifie particulièrement, par exemple, pour les sites de vallée profonde et humide, où les vents dominants et les pluies peuvent être tout à fait déviés par le relief. Il en va de même pour les sites de "col", passage entre vallées qui favorisent les courants d'air.

POSITION DU SOLEIL : COORDONNÉES SOLAIRES [ARDO-13]

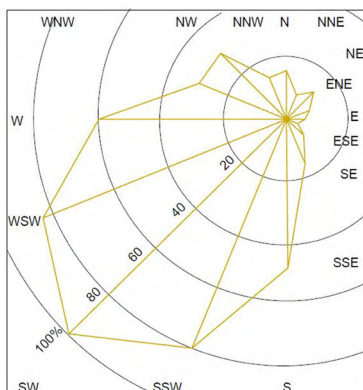
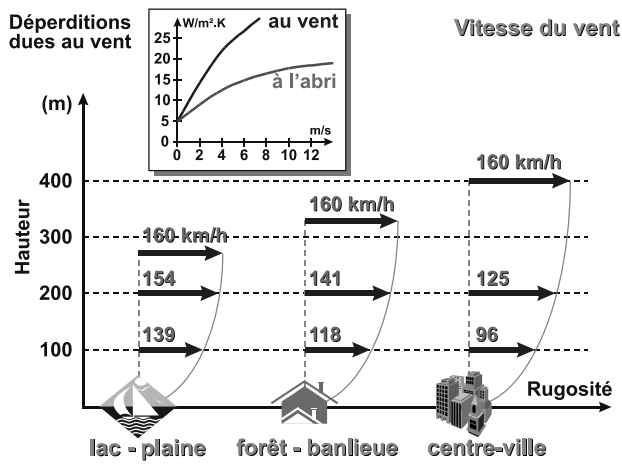


Un observateur se trouvant sur terre repère la localisation du soleil par deux paramètres appelés l'azimut et la hauteur du Soleil. La hauteur est un angle qui varie de 0 à 90°, tandis que l'azimut varie de -45° à +45° (par convention l'angle est négatif à l'est et positif vers l'ouest). On peut ainsi représenter la hauteur du soleil en fonction de l'azimut pour un jour donné. Il s'agit d'une représentation paramétrique à 2 dimensions de la course du soleil.

COURBES SOLAIRES EN PROJECTION CYLINDRIQUE [BRUX-13]



VITESSE DU VENT EN FONCTION DE LA HAUTEUR ET DE LA NATURE DE L'ENVIRONNEMENT [LIEB-09]



LA PLUIE EN BELGIQUE : PRODUIT DE L'INTENSITÉ MOYENNE DES PLUIES BATTANTES PAR LEUR DURÉE MOYENNE, AU COURS D'UNE ANNÉE (1931 -1960) [CSTC-98]

- le régime des vents ;
- l'humidité (surtout si climats à température élevée).

• La position du soleil

Elle permet de déterminer les surfaces éclairées suivant les journées et suivant les saisons.

La hauteur α et l'azimut γ déterminent la position du soleil et donc la direction du rayonnement solaire.

• L'éclairement du soleil

Il exprime l'intensité du rayonnement solaire reçu par les surfaces. Cette intensité dépend de la composition de l'atmosphère (poussières, microgouttes d'eau en suspension, molécules d'air et toutes autres particules contenues dans l'atmosphère).

• Les conditions de température

La température extérieure révèle l'ambiance thermique du milieu. Ce critère n'est pas une grandeur physique ; cela représente l'état thermique d'un corps.

Dans l'environnement humain, soit dans une couche d'une trentaine de mètres au-dessus du niveau du sol, la température est essentiellement influencée par l'ensoleillement, le vent et la nature du sol.

La température varie également suivant la couverture nuageuse ; lorsque les journées sont claires, la température aura tendance à s'élever parce que les radiations reçues à la surface de la terre seront plus importantes. Par contre, lorsque les nuits sont claires, la terre et donc l'atmosphère se refroidit plus à cause des radiations nocturnes.

• Le régime des vents

Les vents ou déplacements d'air sont issus de différences de pression dans l'atmosphère provoquées par des facteurs climatiques complexes.

Vu l'importance des obstacles au sol, le flux d'air est généralement turbulent dans l'environnement humain.

Le régime des vents est caractérisé par les directions et les vitesses et permet de prévoir les abris et les surfaces exposées aux échanges thermiques et aux intempéries. Dans nos régions, il y a une prédominance nette des vents OSO et SO (vents provenant des alizés chauds), et, dans une moindre mesure N-E (vents polaires froids et secs). Ils sont secs s'ils viennent plutôt de l'est, ou généralement chargés en pluie s'ils viennent de l'ouest. Il est important pour le confort des individus de considérer ce facteur climatique lors d'une mission d'architecture car le vent dirige les précipitations, modifie les échanges par convection sur l'enveloppe ainsi que le niveau d'infiltration dans les bâtiments.

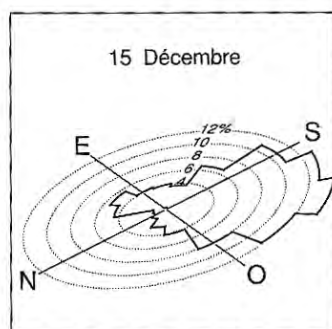
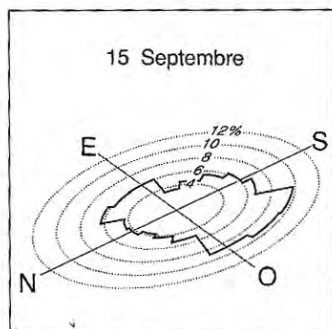
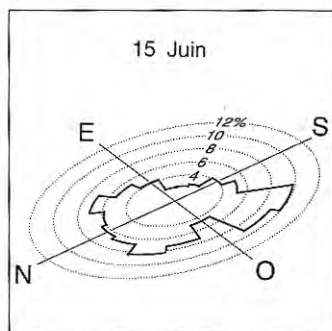
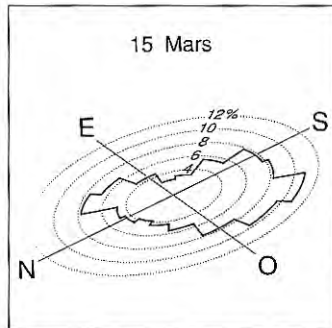
LE MICROCLIMAT

En Belgique, il existe plusieurs types de microclimat : la côte, les plaines et plateaux, les vallées, les bois et forêts, les villes et zones urbanisées.

Le microclimat dépend :

- des obstacles ;
- de la turbidité de l'air ;
- de la nature du sol ;
- de l'aménagement ;

LE VENT EN BELGIQUE [IBN -03]



- de la topographie ;
- du gradient de température.

• Les obstacles

D'un point de vue physique, on classe les obstacles au vent en trois catégories : le relief, le cadre bâti et la végétation.

Ces obstacles, dont l'effet dépend de leurs dimensions et leur perméabilité, constituent diverses obstructions et provoquent des modifications de la vitesse et de la direction du vent. En outre, ils peuvent occasionner des effets secondaires tels que des courants d'air et des turbulences.

• La turbidité de l'air

Lors de la traversée de l'atmosphère, les radiations solaires sont absorbées par les molécules d'air et les aérosols et peuvent être absorbées et réfléchies par les poussières et microgouttelettes en suspension.

De manière générale, les troubles sont moins importants au-dessus de la campagne qu'au-dessus d'une ville ; ces troubles sont les plus faibles au-dessus d'une région boisée car les arbres sont capables de filtrer les poussières et d'absorber la vapeur d'eau.

• La nature du sol

La température de l'air en un lieu est directement dépendante de la nature des surfaces environnantes interceptant la radiation solaire.

La nature du sol est donc déterminante dans le phénomène d'échauffement de l'air provoqué par la réémission sous forme de rayonnement à grande longueur d'onde, et par convection.

Il existe 3 grandes catégories de sol :

- les sols couverts de végétation (herbes, taillis,...) ;
- les sols aménagés par l'homme et couverts par des matériaux à forte inertie (béton, pavés, pierraille,...) ;
- les surfaces réceptrices telles que les étendues d'eau.

Ci-dessous sont décrits les rôles de ces sols dans la captation et le stockage de l'énergie solaire.

- Les sols couverts de végétation favorisent l'évapotranspiration d'eau et ainsi la réduction de l'échauffement de l'air ; la végétation agit comme une couverture isolante.
- Les sols aménagés par l'homme et couverts par des matériaux à forte inertie permettent le stockage de la chaleur durant les journées ensoleillées et la restitution pendant la soirée. Ils ont pour effet de retarder la chute de température nocturne.
- Les surfaces réceptrices c'est-à-dire les étendues d'eau permettent le stockage de grandes quantités de chaleur avec aisance.

L'eau agit comme tampon thermique en réémettant la chaleur par rayonnement et convection lors des chutes de température. Elle réduit donc les variations extrêmes. A l'inverse des sols qui s'échauffent et restituent la chaleur rapidement, l'eau emmagasine et restitue la chaleur plus lentement.

• L'aménagement

La température d'un lieu est influencée par l'occupation ou l'aménagement du sol à cet endroit.

On distingue trois catégories de "sites" différents :

- Les régions boisées interceptent 60 à 90% de la radiation solaire, empêchant l'augmentation de la température du sol.
De plus, les arbres empêchent la radiation nocturne : la chute des températures durant la nuit est limitée.
Ce phénomène est permanent ou saisonnier.
- Les villes ou régions urbanisées subissent également l'influence des apports gratuits provenant des véhicules, des industries, du chauffage, ainsi que la nature du sol et l'importance des matériaux à forte inertie.
De plus, le dôme de pollution recouvrant ces zones urbanisées limite également les radiations nocturnes, de telle sorte qu'en moyenne, la température en ville est de 2 à 3 degrés plus élevées qu'en site dégagé.
La présence de la pollution ralentit le réchauffement matinal de l'air et la grande quantité de matériaux accumulateurs freine la chute de température en début de soirée.
- Les sites dégagés subissent fortement l'influence des vents et sont largement ouverts vers la voûte céleste. Il fait donc plus froid qu'ailleurs et les variations de température y sont plus importantes.

REMARQUES

Le relief (ou topographie) engendre éventuellement des modifications par rapport aux données générales relatives au vent.

La végétation se distingue des autres types d'écran car elle est éventuellement saisonnière et, de plus, présente une opacité partielle.

• La topographie

L'influence du relief sur la température provient de variations qu'il induit de jour sur l'irradiation des pentes (variations suivant l'orientation et suivant l'inclinaison) et des variations créées par le régime de vent.

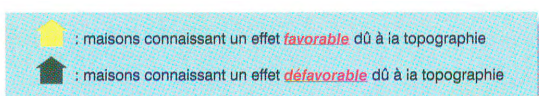
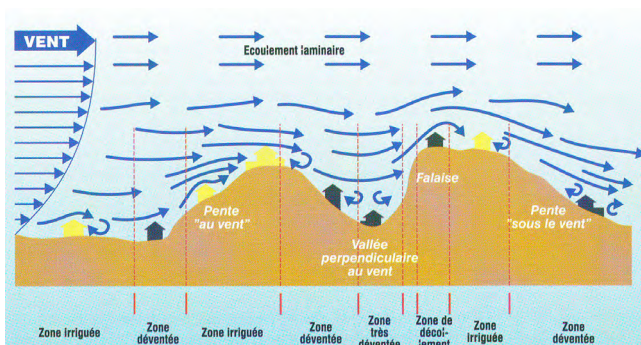
De nuit (et en l'absence de soleil), l'air se refroidit. Etant donné que l'air froid est plus lourd que l'air chaud, il s'accumule au fond des vallées mais également au fond des petites dépressions.

Il se crée donc une différence de température au profit des pentes directement en contact avec ce qu'on appelle la "ceinture chaude".

L'altitude a également une influence sur la température car la pression diminuant avec l'altitude, l'air se dilate et se refroidit, et ce, d'environ 0,7°C par accroissement d'altitude de 100 mètres.

• Le gradient de température

Les gradients de température principalement créés par l'ensoleillement sont responsables des mouvements d'air. Ils engendrent l'ascension de masses d'air chaud et un appel d'air froid.



INFLUENCE DE LA TOPOGRAPHIE SUR LA VENTILATION NATURELLE DUE AU VENT, DANS LES PAYS CHAUDS ET HUMIDES [BARN-97] :
selon la direction du vent, la topographie crée des zones favorables (irriguées) et des zones défavorables (déventées) à la ventilation naturelle

LE PROGRAMME ARCHITECTURAL

LE ZONAGE DES ACTIVITÉS ET LA THERMIQUE PASSIVE

Pour optimiser l'approche thermique d'un bâtiment, l'idéal est d'organiser, dès la première formulation spatiale du bâtiment, les locaux suivant leurs besoins. Cette première esquisse naît d'une réponse au programme mis en situation et souvent d'une approche solaire passive.

• Les zones de jour

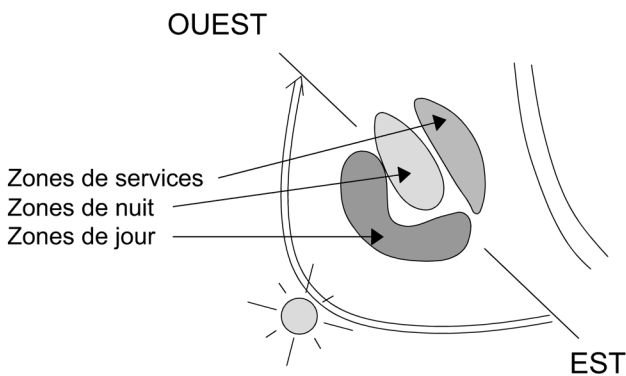
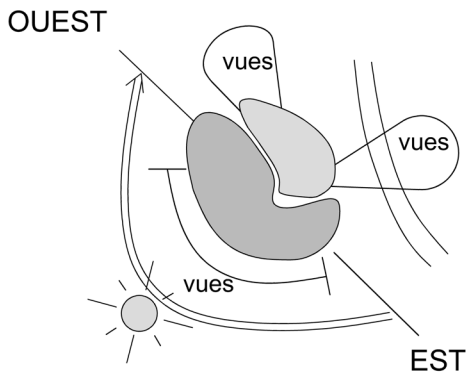
Elles vont prendre naturellement une part primordiale vers le sud et vers les vues à privilégier. Elles seront protégées du nord par des espaces de service et des espaces de nuit qui serviront d'espaces tampons.

• Les zones de services

Elles seront situées de préférence du côté opposé aux espaces de vie, de façon à les "protéger" des nuisances extérieures telles que, entre autres, le froid et le bruit.

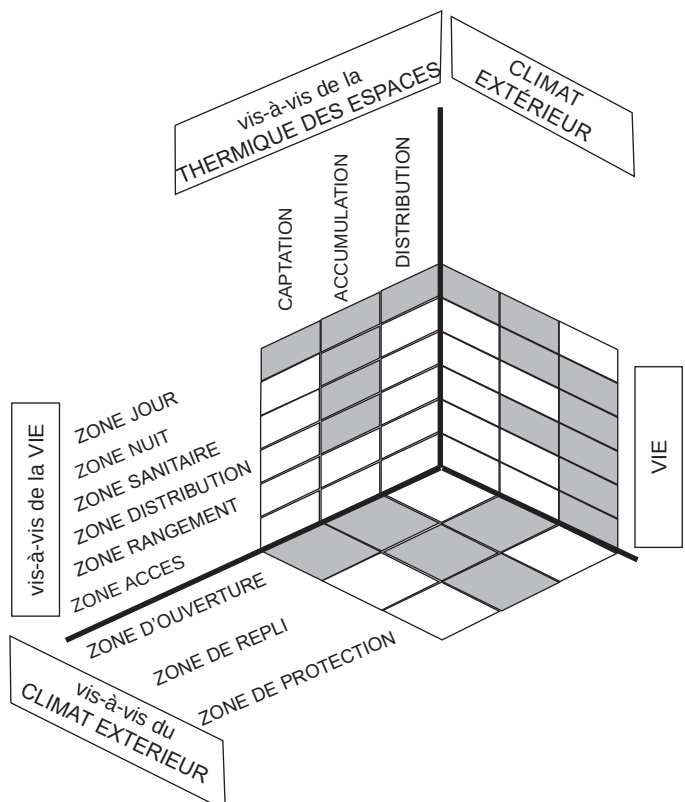
• Les zones de nuit

Elles seront des zones de repli et de protection sur les côtés les moins ensoleillés. Ces zones serviront d'accumulation de chaleur mais d'une façon modérée pour assurer au logement, par leur inertie, une température peu changeante.

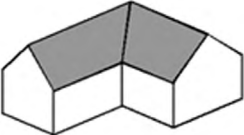
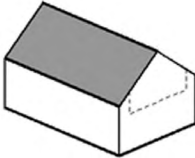
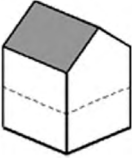
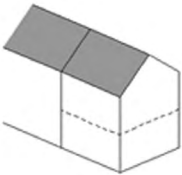
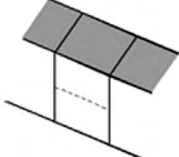


MATRICE DES RELATIONS VIE - ÉNERGIE - SOLAIRE PASSIF
SELON LES TYPES D'ESPACE

HIÉRARCHIE VIS-À-VIS DE LA VIE	HIÉRARCHIE VIS-À-VIS DU CLIMAT EXTÉ- RIEUR	HIÉRARCHIE VIS-À-VIS DE LA THERMIQUES DES ESPACES
<u>Zone de jour</u> - séjour - coin à manger - bureau - cuisine - salle de jeux	<u>Zone d'ouverture vers</u> - la lumière - le soleil - les vues - la terrasse	<u>Zone de captation</u> - face au sud (SE-SO) - espaces vitrés...
<u>Zone de nuit</u> - chambres - bains	<u>Zone de repli</u> - lieu de vie où l'on se protège en s'y reti- rant, loin du contact de l'extérieur	<u>Zone d'accumu- lation</u> Parois, planchers, murs Trombe, stoc- kage semi-actif
<u>Zone sanitaire</u> - bains - wx - buanderie		<u>Zone de distribution</u> Escaliers, mezza- nine, couloir, garage permettant la thermocirculation naturelle
<u>Zone de distribution</u> - hall - couloir - escalier		
<u>Zone de rangement</u> - garage - atelier - appentis - cave	<u>Zone de protection</u> - espaces tampons - extérieurs - intérieurs - non chauffés - non chauffés et isolés - chauffés légère- ment et isolés	
<u>Zone d'accès</u> (ext. immédiat. proche) - terrasse - porches		



LA COMPACITÉ ET LA DENSITÉ DU BÂTI

MAISONS DE 100 M ² CHAUFFÉS SUR 1 OU 2 NIVEAUX, AVEC OU SANS MITOYENNETÉ	TYPE DE BÂTIMENT	V/A _T
	 DE PLAIN-PIED	0,74
	 1,5 NIVEAUX SEULE	1
	 2 NIVEAUX SEULE	1,03
	 2 NIVEAUX SEMI-MIToyENS	1,18
	 2 NIVEAUX MIToyENS	1,39

La compacité d'un bâtiment permet de qualifier les volumes construits en indiquant leur degré d'exposition aux conditions climatiques ambiantes.

Elle s'exprime comme le rapport du volume habitable V (en m³) à la surface d'enveloppe extérieure de déperdition A_T (en m²) ou encore comme le rapport de la surface d'enveloppe à la superficie protégée thermiquement A_{ch} (appelé facteur de forme).

Comme une enveloppe de bâtiment correspond à sa surface de "peau" en contact avec les différents milieux extérieurs (air, eau, terre,...), c'est essentiellement par ces contacts que les échanges thermiques auront lieu entre climat intérieur et climat extérieur.

Un bâtiment présentant un volume maximum pour une surface minimale d'enveloppe extérieure sera évidemment plus performant vu sous le seul angle des échanges thermiques.

La sphère ou la demi-sphère (l'igloo) sont les formes idéales. Sans aller à cet extrême, nous dirons que les formes "trapues", "carrées" sont celles qui sont les plus efficaces. Toutes les excroissances volumétriques ou planes animant ces volumes de base seront autant de surfaces d'échange de chaleur et diminueront la compacité.

Les mêmes considérations au point de vue micro-urbain peuvent mener à la densification de l'habitat et au groupement de celui-ci.

Mais ce thème, très important dans le cadre de l'UDE, ne rentre pas dans les préoccupations immédiates de ce guide pratique.

Une manière plus abordable pour l'auteur de projet de rendre un projet compact mais architecturalement intéressant est de créer un volume isolé compact et d'annexer des espaces non protégés à ce volume compact et économe en énergie. Le bâtiment dans son ensemble peut alors présenter une volumétrie plus morcelée, tout en conservant des performances énergétiques intéressantes.

LA COHÉRENCE ENTRE LES TECHNOLOGIES D'ENVELOPPE

Il est fréquent de composer un bâtiment en changeant de technologies constructives entre différentes parties d'enveloppe et même dans le même élément fonctionnel (par exemple une façade avec une base en maçonnerie et une élévation en ossature bois ou en bardage isolant en acier). Dès que l'on invente ce type de composition, il est important de penser à la frontière entre les deux et de viser à une continuité de la zone thermique.

De la même façon, le positionnement des fenêtres par rapport au plan de façade par exemple, va dépendre de la position choisie pour la zone isolante.

Ceci a évidemment un impact sur l'expression architecturale des façades et sur celle du bâtiment en général.

Si l'on déroge à ce principe pour des questions architecturales, il faut directement intégrer le fait que la zone isolante va devoir être infléchie et que les parties en décrochement vont devoir être isolées également.

Le fait de concevoir une isolation de type mixte (extérieur et intérieur suivant les parties) entraîne aussi ce genre de réflexion technologique pour assurer la meilleure continuité possible.

Il est important d'avoir à l'esprit ces problématiques lorsque l'on compose l'esquisse d'un bâtiment.

Une grosse partie des difficultés de mise en place d'une continuité d'isolation vient de la non-intégration de ces principes dès les premiers stades de la conception.

LA CONTINUITÉ DE L'ISOLATION THERMIQUE DANS LA PAROI, COMBINÉE OU NON À UN PARE-VAPEUR

• Le principe

Le principe de la continuité de la zone isolante constitue un des points essentiels pour que le bâtiment présente un comportement sain au point de vue hygrothermique.

Cette continuité doit empêcher l'existence de passages privilégiés de la chaleur appelés ci-dessus "*ponts thermiques*", déjà abordés précédemment (pp. 36 à 39).

Cette continuité est cruciale, notamment dans toutes les jonctions entre les éléments de l'enveloppe et entre celle-ci et les planchers et parois intérieurs. Cependant, des "*percements*" par points sont difficilement évitables, pour des raisons structurelles.

La conception va devoir, dès la première esquisse, gérer la problématique de la continuité des performances de l'enveloppe et les difficultés présentées par les différentes ruptures de forme de l'enveloppe.

Ainsi, il est essentiel, d'une part, de faire un choix quant à la position de la couche isolante dans les parois extérieures et, d'autre part, de prévoir la continuité totale de cette couche.

S'il est nécessaire, le pare-vapeur, toujours placé du côté chaud du matériau d'isolation thermique (donc, en principe, côté intérieur) aura une continuité totale.

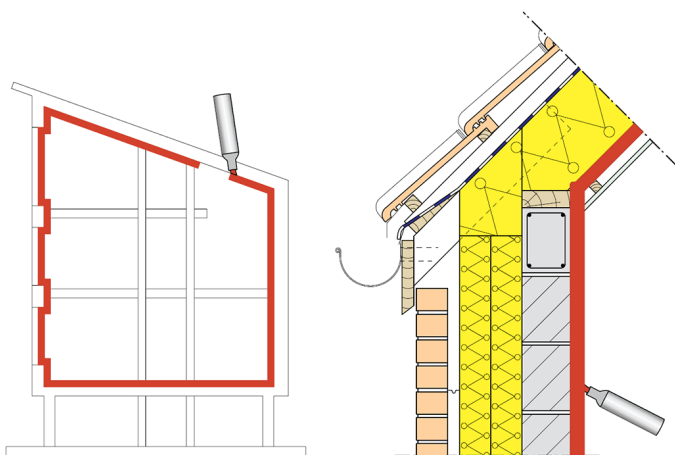
• Les différentes jonctions possibles et ruptures de forme

Les ruptures de forme de l'enveloppe sont de différents types allant des plus grandes aux plus petites.

Toute discontinuité dans la zone isolante constitue un passage privilégié par lequel passe la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur de l'enveloppe.

Ce type de passage est le pont thermique ; il peut être surfacique ou linéique (bord de fenêtre, poutres de ceinture non isolées, ancrage de terrasse, etc.).

Ceci a un impact sur la déperdition d'énergie et également sur le comportement hygrométrique de la paroi à cet endroit.

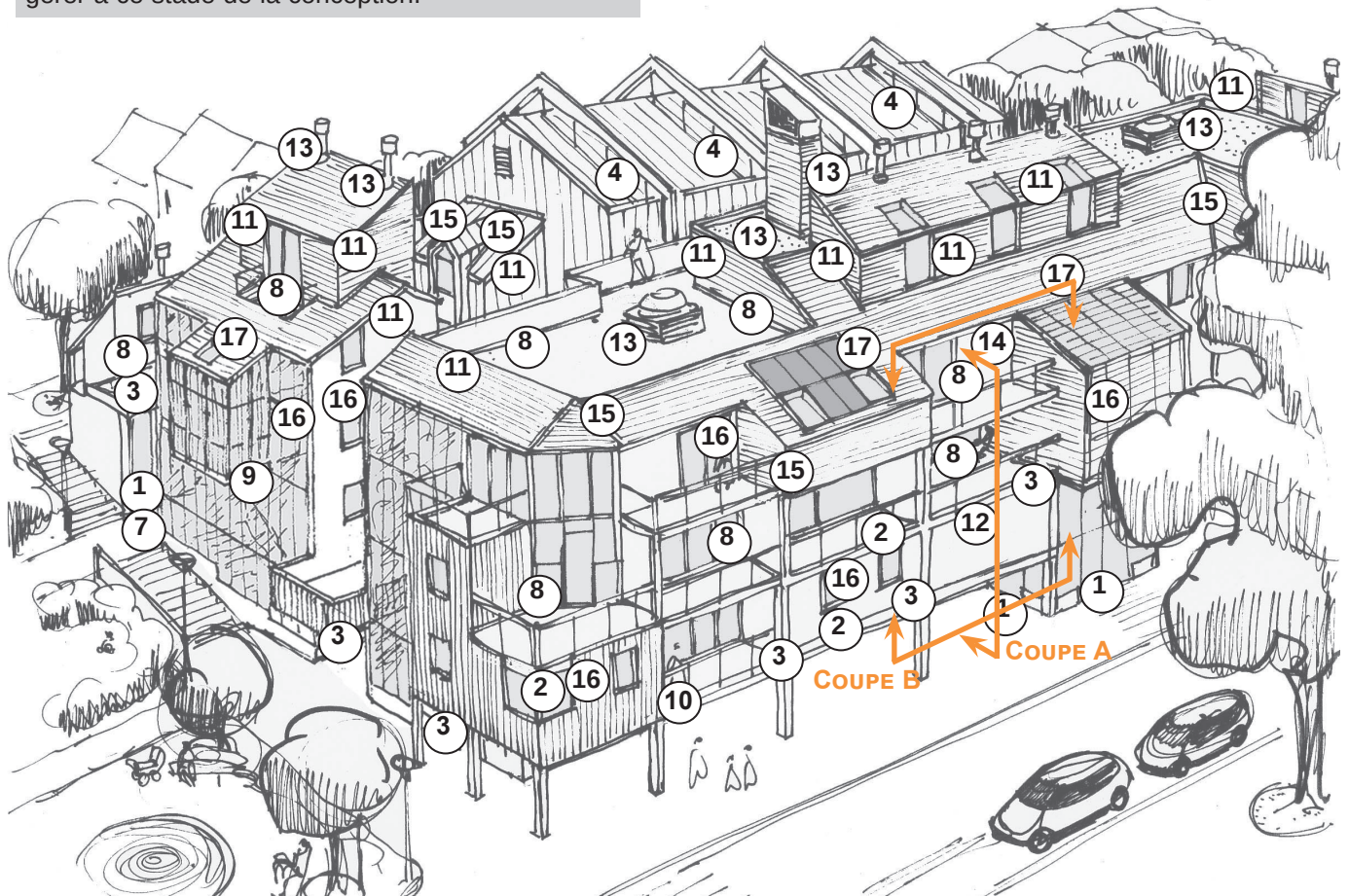


CONTINUITÉ DE L'ISOLATION THERMIQUE ENTOURANT LE VOLUME PROTÉGÉ, COMBINÉE OU NON À UN PARE-VAPEUR [CSTC-15]

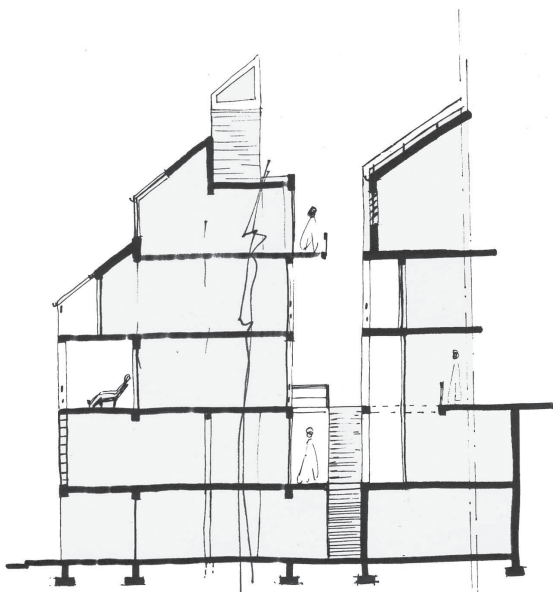
LES PRINCIPES ET OUTILS DE CONCEPTION

En effet, la température de surface intérieure est plus basse à cet endroit que celle des parois environnantes ; dans le cas où la pression de vapeur du local est trop importante, il y a risque de condensation non seulement en surface mais aussi au sein de la paroi.

L'exemple suivant relève une série de problèmes à gérer à ce stade de la conception.

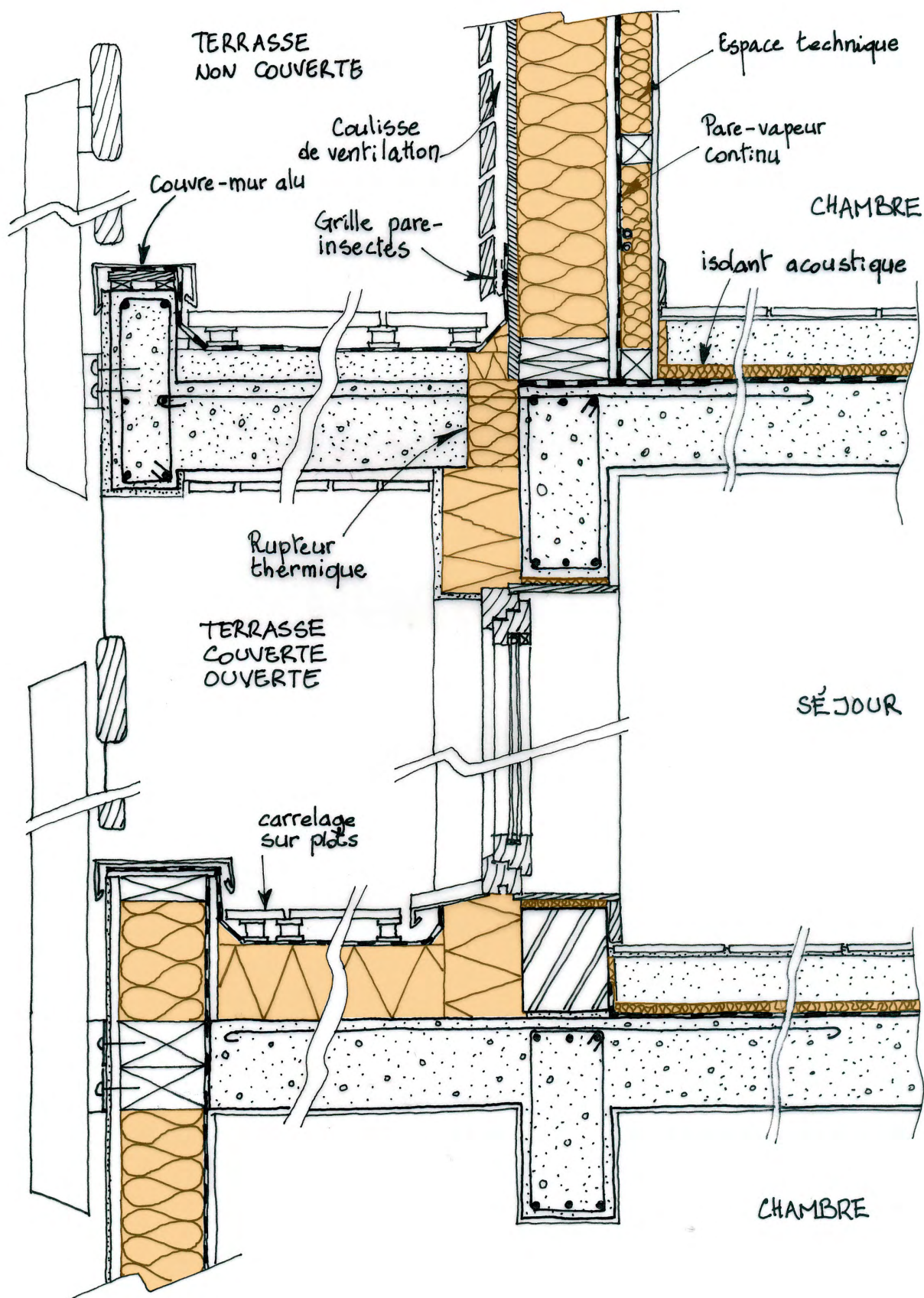


QUELQUES EXEMPLES DE LIAISONS ARCHITECTONQUES MÉRITANT UNE ANALYSE DÈS LES PREMIERS STADES DE LA CONCEPTION



LÉGENDE

- 1 - Liaisons fondations / pied de façade
- 2 - Liaisons enveloppe / structure
- 3 - Percement d'enveloppe par la structure
- 4 - Liaisons enveloppe suspendue / structure extérieure
- 5 - Liaisons plancher sur sol / façade
- 6 - Liaisons plancher / façade
- 7 - Liaisons façade / mur contre terre
- 8 - Liaisons façade / terrasse / plancher
- 9 - Liaisons façade / oriel / plancher
- 10 - Liaisons façade / loggia / plancher
- 11 - Liaison toiture / façade / pignon
- 12 - Liaisons toiture / murs intérieurs
- 13 - Liaisons toiture / cheminée
- 14 - Liaisons façade / façade
- 15 - Liaisons toiture / toiture
- 16 - Liaisons façade opaque / ouverture vitrée ou non
- 17 - Liaisons toiture / fenêtre de toiture



COUPE A (PARTIE SUPÉRIEURE) : LIAISON DU BALCON ET DU MUR EXTÉRIEUR AVEC RUPTEUR THERMIQUE SÉPARANT LE BÉTON ARMÉ DE L'ENCORBELLEMENT, DE SON APPUI DANS LE BÉTON ARMÉ DU PLANCHER INTÉRIEUR

Le balcon, supportant une terrasse extérieure non couverte, ne comporte pas d'isolation thermique. Mais est thermiquement séparé du volume protégé, par un rupteur thermique inséré entre la poutre-linteau et la dalle du balcon, d'une conductivité thermique λ_D de 0,04 W/Mk et d'une épaisseur de 8 cm.

Si l'on se reporte aux conditions de la règle de base 2 d'un nœud PEB-conforme reprises à l'option B (voir p. 39), il faut interposer un matériau :

- dont la conductivité thermique est $\leq 0,2$ W/mK ;
- apportant une résistance thermique d'au moins de $2 \text{ m}^2\text{K/W}$;
- et en contact suffisant avec les 2 couches d'isolation thermique qu'il relie.

Le rupteur thermique permet de respecter ces 3 conditions :

- sa conductivité thermique de 0,04 W/mK est bien inférieure à $0,2$ W/mK ;
- d'une épaisseur de 8 cm et d'une conductivité thermique de 0,04 W/mK, il apporte une résistance thermique de $2 \text{ m}^2\text{K/W}$;
- et il est bien en contact avec les couches d'isolation thermique qu'il relie.

On peut donc dire que, qualitativement, selon cette règle de base, le nœud constructif de la dalle du balcon est effectivement PEB-conforme.

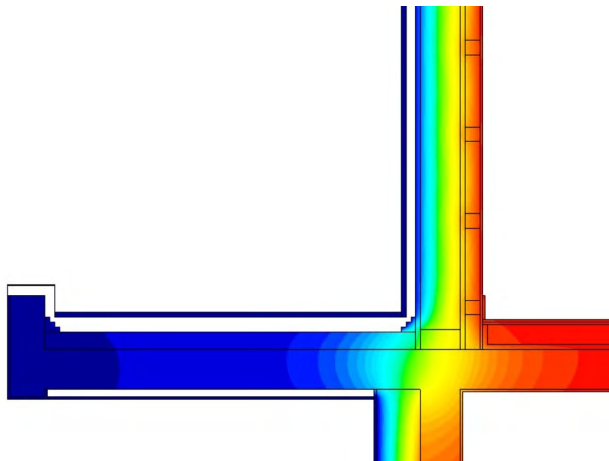
Il est possible de comparer, cette fois quantitativement, ce que représente le transfert thermique au travers du nœud constructif, par le logiciel TRISCO, avec et sans rupteur thermique.

Les résultats obtenus sont les suivants :

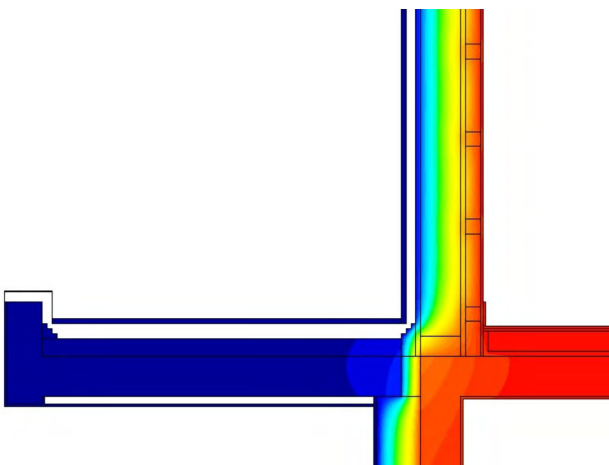
- sans rupteur thermique, le nœud constructif présente un important coefficient de transmission linéique k_l de $1,343 \text{ W/mK}$;
- avec le rupteur thermique, ce coefficient k_l se réduit à la valeur de $0,423 \text{ W/mK}$.

Le rupteur thermique permet ainsi de réduire de 69 % l'impact du nœud constructif sur les déperditions.

Les 2 figures ci-contre illustrent les courbes obtenues avec la simulation numérique.



**SIMULATION DU NOEUD CONSTRUCTIF
SANS RUPTEUR THERMIQUE**



**SIMULATION DU NOEUD CONSTRUCTIF
AVEC RUPTEUR THERMIQUE**

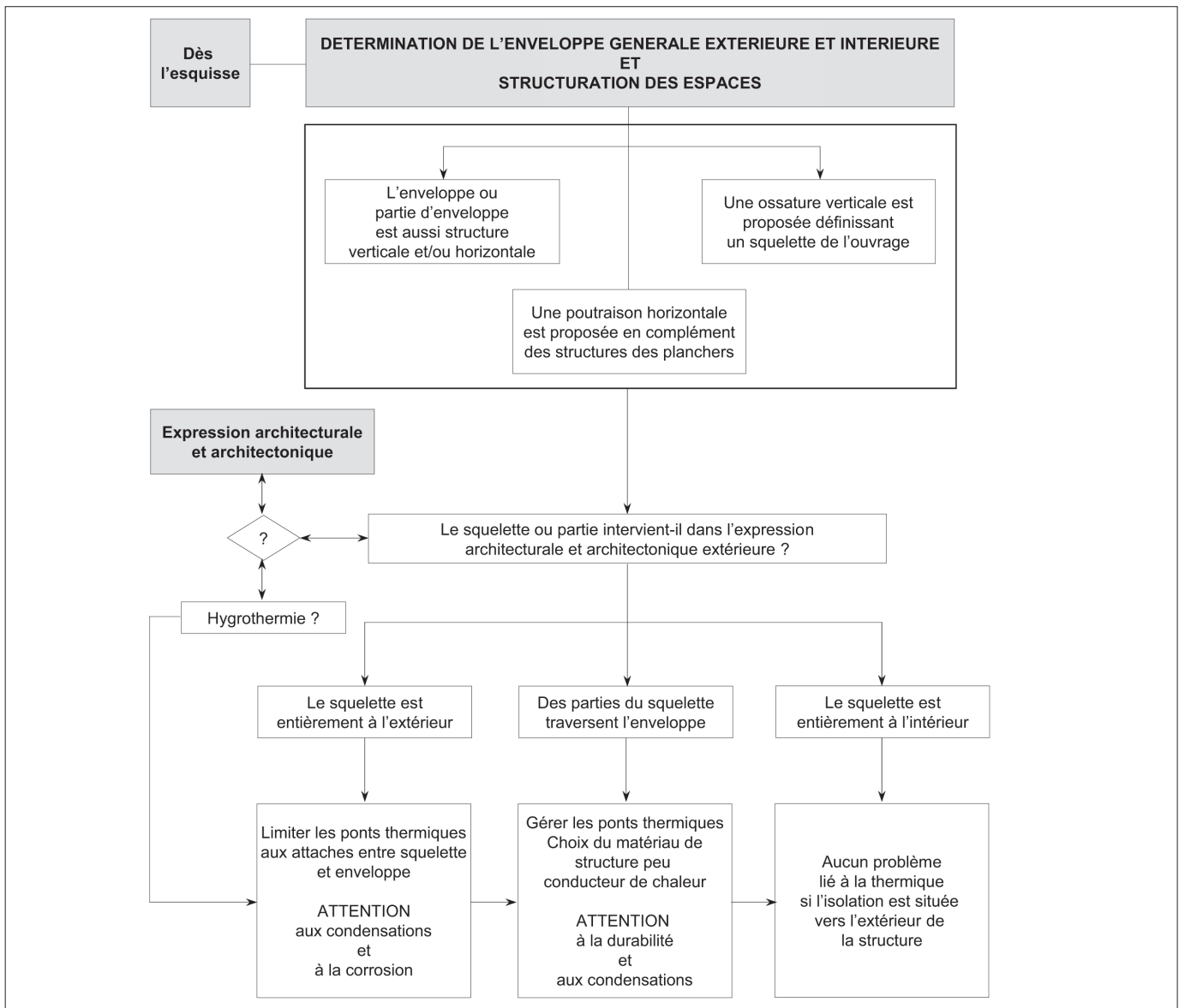


LÉGENDE DES TEMPÉRATURES DE LA SIMULATION TRISCO DES FIGURES CI-DESSUS

LES RELATIONS STRUCTURE / ENVELOPPE

La composition architecturale induit la structuration des espaces et détermine de ce fait la structure du bâtiment. Celle-ci peut être confondue totalement ou partiellement avec l'enveloppe en s'exprimant par une ossature distincte.

Son impact sur l'expression architecturale et architectonique peut être primordiale. Dès l'esquisse il est important de confronter structure, enveloppe et thermique. L'organigramme ci-dessous constitue un outil de réflexion pour la conception.



LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

L'insécurité de l'approvisionnement énergétique et la hausse du prix de l'énergie, consécutive aux chocs pétroliers ou à des événements géopolitiques majeurs, ont encouragé les pays industrialisés à mettre en œuvre des réglementations énergétiques.

Ainsi la Wallonie a été, en Belgique, la première Région à imposer une qualité d'isolation thermique aux logements neufs, dès 1985. Des motivations d'ordre environnemental (à Rio 1992 et lors des conférences internationales dont Kyoto en 1997 et plus récemment Paris en 2015) se sont ajoutées, entraînant un renforcement graduel de la sévérité des critères et une étendue progressive de la portée de la réglementation :

- aux logements ;
- aux bâtiments tertiaires (bureaux et écoles) ;
- enfin, à tous les bâtiments neufs ou rénovés, avec ou sans changement d'affectation.

C'est lors de la demande de permis d'urbanisme, qu'il faut prouver, par calcul, que les options constructives et techniques choisies garantissent, à l'unité PEB ou à chacune des unités PEB qui composent le bâtiment, une performance énergétique globale satisfaisante, selon six critères :

- la valeur U des parois ;
- le niveau d'isolation thermique globale K ;
- le niveau de consommation d'énergie primaire E_w ;
- la consommation d'énergie spécifique $E_{spéc}$;
- l'indice de surchauffe ;
- la ventilation de l'unité PEB.

qui s'appliquent ou non au projet, selon :

- la nature des travaux soumis à permis d'urbanisme : construction d'un bâtiment neuf ou assimilé, ou rénovation (importante ou simple ; et avec ou sans changement d'affectation, le bâtiment initial étant ou n'étant pas chauffé) ;
- le type de bâtiment : unité PER (de logement individuel) ou unités PEN (non résidentielles ou de logement collectif) ou bâtiment industriel.

La figure de la page suivante illustre les critères qui s'appliquent (ou non) aux projets de construction et de rénovation, conformément aux exigences PEB en vigueur du 1/01/17 au 31/12/20.

Outre les remarques reprises en commentaires sous la figure, voici quelques précisions complémentaires :

- Est **assimilée à la construction** d'un bâtiment neuf :
 - l'extension, soumise à permis, qui ajoute un volume protégé supérieur à 800 m³, ou qui, au moins, double le volume protégé existant ;
 - la rénovation qui remplace les installations techniques et au moins 75 % de l'enveloppe existante ;
- La **rénovation** est importante si les travaux portent sur au moins 25 % de l'enveloppe. Dans les autres cas, et lorsque les travaux de transformation sont de nature à

LES PRINCIPES ET OUTILS DE CONCEPTION

influencer la performance énergétique du bâtiment, la rénovation est considérée comme simple ;

- Sont soumises aux exigences de **changement de destination**, les unités PEB qui acquièrent une nouvelle destination et lorsque, contrairement à la situation antérieure, de l'énergie est consommée pour les besoins

NATURE DES TRAVAUX SOUMIS À PERMIS				Valeurs U	Niveau K	Niveau E _w	Consommation spécifique	Ventilation	Surchauffe
				U	K	E _w	E _{spec}	V	S
Procédure AVEC responsable PEB	Bâtiment neuf ou assimilé	PER	Maisons unifamiliales Appartements			65	115 kWh/m ² a n	Annexe C2	< 6.500 Kh
		PEN	Bureaux Services Enseignement Hôpitaux HORECA Commerces Hébergements collectifs ...	≤ U _{max} (1)	≤ K35 + nœuds constructifs	90/65 (2)		Annexe C3	
		I	Industriel		≤ K55 + nœuds constructifs				
	Rénovation importante (4)			uniquement éléments modifiés				(3)	
Procédure SANS responsable PEB Déclaration PEB simplifiée	Rénovation simple, y compris Changement d'affectation chauffé > chauffé (4)			≤ U _{max} (1) des éléments modifiés et neufs				(3)	
	Changement d'affectation non chauffé > chauffé (4)				≤ K65 + nœuds constructifs			Annexe C2 ou C3	

REMARQUES :

- (1) Exigences renforcées pour certaines parois - cf. tableau des valeurs U_{max} pour les parois opaques et vitrées repris ci-après.
- (2) La performance de l'unité PEN est calculée au prorata des exigences (90/65) propres à chacune des parties fonctionnelles – cf. E_w des unités PEN explicité plus loin.
- (3) Selon l'Annexe C2 (VHR) ou l'Annexe C3 (VHN) à l'AGW du 15/12/16 [AGW -16-2], les exigences de ventilation doivent être respectées pour les amenées et les extractions d'air dans les nouveaux locaux, et uniquement les amenées d'air dans les locaux existants lorsque les châssis de portes ou de fenêtres extérieures sont remplacés.
- (4) Cas particuliers concernant les bâtiments industriels :
 - la rénovation simple ou importante d'un bâtiment industriel n'est soumise à aucune exigence PEB ;
 - tout bâtiment industriel, initialement chauffé ou non chauffé pour les besoins de l'homme, qui, par changement de destination, acquiert une destination de logement individuel, de bureaux et de services, ou d'enseignement, est soumis aux mêmes exigences que dans le cas d'un changement de destination « non chauffé > chauffé » : valeurs U_{max}, niveau K, et ventilation.

des personnes en vue d'obtenir une température intérieure spécifique ;

- Une **étude de faisabilité technique, environnementale et économique** est requise pour tout bâtiment neuf ou assimilé. Pour les bâtiments dont la superficie utile totale* est inférieure à 1.000 m², le responsable PEB peut effectuer cette étude de faisabilité.

* On entend par superficie utile totale (S_{UT}), la superficie totale de tous les niveaux du bâtiment hors murs extérieurs et y compris les espaces adjacents non chauffés.

ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION		U_{max} [W/(m ² ·K)]
Parois délimitant le volume protégé	Toitures et plafonds	0,24
	Murs ⁽¹⁾	0,24
	Planchers ⁽¹⁾	0,24
	Portes et portes de garage	2,00
	Fenêtres : - ensemble châssis et vitrage - vitrage uniquement	1,50 1,10
	Murs-rideaux : - ensemble châssis et vitrage - vitrage uniquement	2,00 1,10
	Parois transparentes/translucides autres que les portes, portes de garage et murs-rideaux (voir ci-dessus), et autres que le verre : - ensemble châssis et partie transparente - partie transparente uniquement (ex : coupole de toit en polycarbonate...)	2,00 1,40
	Briques de verre	2,00
	Parois entre 2 volumes protégés situés sur des parcelles adjacentes ⁽²⁾	1,00
	Parois opaques à l'intérieur du volume protégé ou adjacentes à un volume protégé sur la même parcelle ⁽³⁾	1,00

⁽¹⁾ Pour les parois en contact avec le sol, la valeur U tient compte de la résistance thermique du sol et doit être calculé conformément aux spécifications fournies à l'Annexe B1 de l'AGW du 15/12/16

⁽²⁾ A l'exception des parois transparentes/translucides, des portes et des fenêtres, des parois en briques de verre et des parois transparentes/translucides autres que le verre

⁽³⁾ Parois opaques (à l'exception des portes et portes de garage)

COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE U_{MAX} (W/M²K) À RESPECTER, SELON LA RÉGLEMENTATION PEB EN VIGUEUR DU 1/01/17 AU 31/12/20
(VOIR TABLEAU COMPLET REPRIS À L'ANNEXE 3 DE L'AGW PEB DU 28/01/16) [GW -16-1]

LA VALEUR U DES PAROIS

Le coefficient de transmission thermique (U) [W/m²K] représente la quantité de chaleur, en régime stationnaire, qui traverse un élément de construction par unité d'aire, divisée par la différence de température entre l'environnement intérieur et extérieur des deux côtés de l'élément de construction concerné.

Son mode de calcul a été explicité en pages 35 et 36 du présent ouvrage.

La réglementation en vigueur du 1/01/17 au 31/12/20 impose de respecter une valeur U_{max} pour chaque paroi nouvelle (bâtiments neufs), ou reconstruite (bâtiments rénovés), ou modifiée (bâtiment rénovés), qui est reprise dans le tableau ci-contre.

LA VALEUR DU NIVEAU D'ISOLATION THERMIQUE GLOBALE K DE L'UNITÉ PEB

Le niveau d'isolation thermique globale K est un indicateur de la performance énergétique de l'enveloppe du volume protégé.

Le niveau K est calculé sur base :

- des coefficients de transmission thermique des différentes parois et des ponts thermiques ;
- de la surface totale de déperdition ;
- du volume protégé.

Toutes les parois délimitant le volume protégé en contact avec l'environnement extérieur, le sol, les caves, les vides sanitaires et tous les espaces adjacents non chauffés interviennent dans le calcul.

Le niveau K prend donc en compte la volumétrie du bâtiment, sa compacité et sa situation dans l'espace (4 façades, semi-mitoyen, mitoyen, etc.). C'est un facteur qui peut énormément varier à ce niveau. Les exigences énergétiques de plus en plus sévères devraient inciter les concepteurs à construire de manière compacte des bâtiments mitoyens ou des immeubles de grandes dimensions avec beaucoup d'unités fonctionnelles permettant de diminuer les surfaces de déperditions par rapport aux surfaces habitables. Le défi du concepteur se situe donc actuellement à ce niveau ; il doit rester créatif et inventif face à ces exigences volumétriques.

Conformément aux exigences PEB en vigueur du 1/01/17 au 31/12/20, le niveau d'isolation thermique globale K ne peut dépasser :

- pour les bâtiments neufs ou assimilés :
 - PER et PEN : niveau $K \leq K_{35}$;
 - Industriel : niveau $K \leq K_{55}$;
- pour les changements de destination de bâtiments existants préalablement non chauffés et désormais chauffés pour les besoins de l'homme : niveau $K \leq K_{65}$.

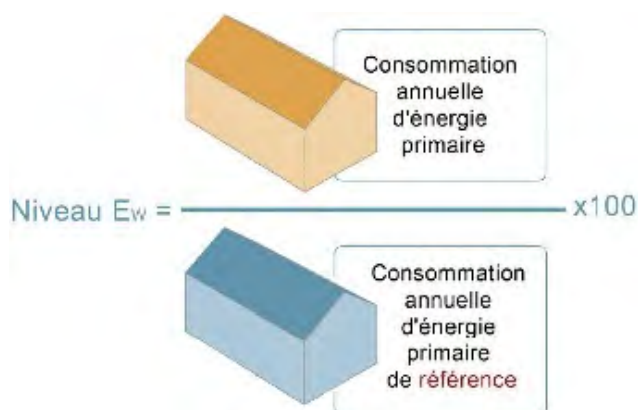
LE NIVEAU E_w DE L'UNITÉ PEB

Le niveau E_w représente le niveau de consommation d'énergie primaire de l'unité PEB. Plus le E_w est faible, plus le bâtiment est énergétiquement performant.

Son mode de calcul est différent pour les unités PER (logements individuels) et pour les unités PEN (bâtiments non résidentiels et de logement collectif).

LE NIVEAU E_w D'UNE UNITÉ PER (LOGEMENT INDIVIDUEL)

Pour les unités PER (logements individuels), le niveau de consommation d'énergie primaire, niveau E_w , est le rapport entre la consommation annuelle d'énergie primaire de l'unité et la consommation annuelle d'énergie primaire d'un bâtiment de référence, multiplié par 100.



Le niveau E_w compare le bâtiment projeté à un bâtiment de référence présentant une volumétrie similaire et des performances standardisées, à savoir :

- un niveau d'isolation thermique globale de l'enveloppe, de K_{45} ;
- une surface de fenêtres = $0,15 A_{ch}$, répartie uniformément sur les orientations N, S, O et E ;
- un système de ventilation mécanique simple flux (type C), un débit de fuite $\dot{V}_{50} = 8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;
- une chaudière mazout basse température (rendement global du système de chauffage = $0,728$) ;
- une préparation instantanée d'eau chaude sanitaire (rendement de production = $0,5$) ;
- une absence totale de refroidissement actif ;
- aucune utilisation d'énergie renouvelable.

Conformément aux exigences PEB en vigueur du 1/01/17 au 31/12/20, le niveau E_w d'une unité PER ne peut dépasser $E_w = 65$.

LE NIVEAU E_w D'UNE UNITÉ PEN (UNITÉS NON RÉSIDENTIELLES ET DE LOGEMENT COLLECTIF)

La méthode de calcul du niveau E_w d'une unité PEN tient compte des activités diverses réalisées dans les locaux du bâtiment, divisé donc selon ses parties fonctionnelles : une partie fonctionnelle est définie comme étant une partie d'un secteur énergétique, délimitée par des parois qui englobent des espaces adjacents ayant la même activité. Une partie fonctionnelle ne peut pas s'étendre sur plu-

LES PRINCIPES ET OUTILS DE CONCEPTION

FONCTION	
Hébergement	
Bureaux	
Enseignement	
Soin de santé	Avec occupation nocturne
	Sans occupation nocturne
	Salle d'opération
Rassemblement	Occupation importante
	Faible occupation
	Cafétéria / Réfectoire
Cuisine	
Commerce / Services	
Sport	Hall de sport / Gymnase
	Fitness / Danse
	Sauna / Piscine
Locaux techniques	
Communs	
Autre	
Fonction inconnue	

sieurs secteurs énergétiques et, selon le type de projet, un secteur énergétique peut contenir autant de parties fonctionnelles que nécessaire.

Chaque partie fonctionnelle est caractérisée par une fonction, telle que reprise parmi les 18 fonctions énumérées dans le tableau ci-contre, dont une fonction "autre" et une fonction "inconnue".

Le choix de cette fonction est déterminé selon les activités reprises au sein de la partie fonctionnelle. Par exemple, dans un hôpital, les espaces destinés aux consultations quotidiennes des patients constitueront une partie fonctionnelle ayant la fonction "Soins de santé sans occupation nocturne", tandis que les chambres d'hospitalisation et tous les espaces annexes seront regroupés au sein d'une partie fonctionnelle ayant la fonction "Soins de santé avec occupation nocturne" ; les espaces destinés à la gestion administrative seront regroupés au sein d'une partie fonctionnelle ayant la fonction "Bureaux".

Pour tenir compte de la spécificité des activités rencontrées dans les bâtiments non résidentiels, chaque fonction est définie en considérant les comportements énergétiques distincts qui la caractérisent. Les paramètres principaux identifiés comme ayant une valeur liée à la fonction sont les suivants :

- les horaires d'occupation (heures par jour et jours par semaine) ;
- les températures intérieures de consigne (pour le chauffage et pour le refroidissement) ;
- les gains internes dus aux personnes et aux appareils ;
- les besoins nets annuels pour l'eau chaude sanitaire ;
- la quantité d'humidité à produire par m³ ;
- le nombre d'heures d'utilisation par mois (en période diurne/nocturne) ;
- le temps de fonctionnement de la ventilation ;
- le niveau de confort lumineux.

L'utilisation du concept de partie fonctionnelle signifie concrètement que, par rapport à la méthode de calcul précédente du E_w pour les bâtiments de Bureaux, Services et Enseignement (BSE), la plupart des équations ont été adaptées et qu'au lieu de contenir des paramètres ayant une valeur fixe, elles contiennent désormais des paramètres variables dont les valeurs dépendent de la fonction et sont définies dans des tableaux. Ce niveau de détail est intéressant car il permet dès lors de tenir compte, par exemple, d'horaires de fonctionnement, de températures de consigne ou de niveaux d'éclairement spécifiques.

Il faut ainsi effectuer des sommes sur toutes les parties fonctionnelles d'un secteur énergétique, pour établir les bilans énergétiques des besoins nets à ce niveau. Les autres principes de la méthode de calcul BSE permettant d'établir la consommation totale en énergie primaire sont quasi inchangés.

$$E_{w,PEN} = \frac{\sum A_{ch,fct f} \cdot E_{w,fct f}}{A_{ch}}$$

Où :

$E_{w,PEN} [-]$ = E_w de l'unité PEN étudiée ;

$A_{ch} [m^2]$ = superficie de plancher chauffé de l'unité PEN ;

$A_{ch,fct f} [m^2]$ = superficie de plancher chauffé de la partie fonctionnelle f ;

$E_{w,fct f} [-]$ = niveau E_w de la partie fonctionnelle f.

Un autre changement majeur concerne le calcul de la consommation de référence. Pour rappel, l'indicateur "niveau E_w " consiste à comparer la consommation théorique du bâtiment étudié à une consommation de référence. Dans la méthode de calcul BSE, la formule du référentiel (autrement dit le dénominateur) était déterminée sur base d'une étude statistique.

Dans la méthode PEN, l'approche choisie pour la détermination du référentiel est toute autre car elle se base sur un "recalcul". Concrètement, la géométrie de l'unité PEN étudiée est conservée mais des valeurs de référence sont fixées pour certains paramètres techniques. Le calcul du niveau E_w revient donc ainsi à comparer la consommation théorique de l'unité PEN projetée, à la consommation théorique qu'aurait obtenue cette même unité PEN si une conception technique de référence avait été appliquée.

Enfin, la dernière particularité de cette nouvelle méthode de calcul PEN est que le niveau d'exigence E_w ne sera plus fixe pour un bâtiment pris dans sa globalité, mais que la valeur à respecter sera variable d'un projet à l'autre et dépendra des équipements (parties fonctionnelles) de l'unité PEN. A titre d'exemple, un hôtel contenant une partie fonctionnelle "Restauration", une partie fonctionnelle "Salle de sports" et une partie fonctionnelle "Salles de conférences", n'aura pas la même valeur E_w à respecter qu'un hôtel ne contenant que des chambres. L'objectif est d'évaluer correctement la performance énergétique d'un bâtiment ou d'une unité en tenant compte des services (fonctions) qu'il offre ou pas, et donc de ses équipements.

Ainsi, comme le niveau E_w est calculé au prorata des parties fonctionnelles du bâtiment, le niveau E_w à respecter se détermine également au prorata des parties fonctionnelles, auxquelles une valeur de E_w maximum de 65 ou de 90 est attribuée (voir tableau ci-contre).

ATTENTION : il n'y a aucune évaluation individuelle au niveau des parties fonctionnelles. Le tableau ci-contre ne signifie pas, par exemple, que chaque partie fonctionnelle "Bureaux" doit respecter individuellement un E_w de 65. La détermination du seuil se fait au niveau de l'unité PEN et c'est uniquement l'unité PEN qui a un indicateur E_w frappé d'une exigence. Concrètement, cela signifie qu'une partie fonctionnelle moins performante que son exigence propre pourra être compensée par d'autres parties fonctionnelles plus performantes que leurs exigences propres ; l'évalua-

FONCTION		$E_{w, fct f}$
Hébergement		90
Bureaux		65
Enseignement		65
Soin de santé	Avec occupation nocturne	90
	Sans occupation nocturne	90
	Salle d'opération	90
Rassemblement	Occupation importante	90
	Faible occupation	90
	Cafétéria / Réfectoire	90
Cuisine		90
Commerce / Services		90
Sport	Hall de sport / Gymnase	90
	Fitness / Danse	90
	Sauna / Piscine	90
Locaux techniques		90 ou 65
Communs		90 ou 65
Autre		90
Fonction inconnue		90

tion globale au niveau de l'unité PEN permet au E_w global de cette unité PEN d'être égal ou inférieur au seuil déterminé.

Toutes les fonctions ont un niveau d'exigence par fonction égal à 90, à l'exception des fonctions "Bureaux" et "Enseignement". Cette différence est justifiée par la volonté d'établir pour ces fonctions, une exigence PEN renforcée par rapport à l'exigence précédente.

Le tableau des exigences par fonction ci-contre sera renforcé à l'horizon 2021 (2019 pour les bâtiments publics). Les niveaux renforcés seront déterminés sur base d'une étude cost-optimum actuellement en cours.

Pour ce qui concerne les fonctions "Locaux techniques" et "Communs" : le niveau d'exigence par fonction de ces deux fonctions est fixé à 90. Mais en l'absence de toute fonction autre que "Bureaux" et "Enseignement" dans une unité PEN, les fonctions "Locaux techniques" et "Communs" devront aussi respecter le niveau d'exigence par fonction applicable aux fonctions "Bureaux" et "Enseignement", à savoir 65. Concrètement, cela signifie qu'une unité PEN ne contenant que des parties fonctionnelles "Bureaux", "Enseignement", "Locaux techniques" et/ou "Communs" devra respecter un niveau $E_w \leq 65$.

LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE SPÉCIFIQUE E_{SPEC}

Applicable aux seules unités PER (logements individuels), la consommation spécifique en énergie primaire E_{spec} est le rapport entre la consommation annuelle d'énergie primaire d'une unité PER et la surface totale de plancher chauffé ou climatisé de cette unité. Elle est exprimée en kWh/m² an.

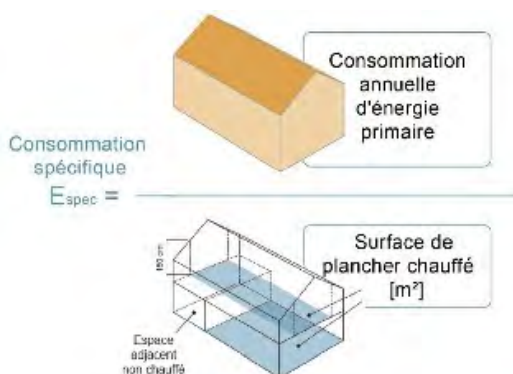
Conformément aux exigences PEB en vigueur du 1/01/17 au 31/12/20, la consommation d'énergie primaire E_{spec} d'une unité PER ne peut dépasser 115 kWh/m².

L'OBLIGATION DE VENTILER L'UNITÉ PEB

Dans le cadre de la PEB, la ventilation des locaux est une exigence réglementaire. La ventilation est indispensable pour garantir la qualité de l'air intérieur et la durabilité du bâtiment. Le rôle du système de ventilation est d'apporter de l'air neuf et d'évacuer, vers l'extérieur, l'air chargé en vapeur d'eau, en odeurs, en polluants, en poussières.

Dans les bâtiments résidentiels, les exigences PEB concernant la ventilation sont basées sur l'annexe C2-VHR de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2] qui fait référence, entre autres, à la norme NBN D50-001. Elles concernent uniquement les locaux ou espaces d'habitation.

Pour tous les immeubles non résidentiels, les exigences PEB sont reprises dans l'annexe C3-VHN de l'AGW de



l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2] qui fait référence, entre autres, aux normes NBN EN 13779:2004 et NBN EN 12599:2000. Elles concernent les espaces destinés à l'occupation humaine ou non.

L'INDICE DE SURCHAUFFE

En isolant de mieux en mieux les bâtiments, il n'est plus vraiment compliqué de maintenir une température de confort en hiver ; par contre, le confort en été est parfois plus difficile à atteindre car l'occupant peut être confronté à des surchauffes qui, dans certains cas extrêmes, s'avèrent insupportables. Dans le tertiaire, cette problématique est déjà abordée quasiment systématiquement car les apports internes, couplés aux apports solaires, représentent une source de chaleur importante.

L'architecture bioclimatique permet de répondre à la gestion des **apports solaires**. Ainsi, les pare-soleils, les débords de toiture et les claustras correctement calculés permettent généralement de diminuer l'impact du trop-plein d'énergie solaire pendant les saisons chaudes ; par contre, les impositions urbanistiques sont parfois contradictoires avec la logique bioclimatique. Il appartient donc aux auteurs de projet d'être très vigilants et inventifs de manière à minimiser les apports solaires intempestifs aux mauvais moments.

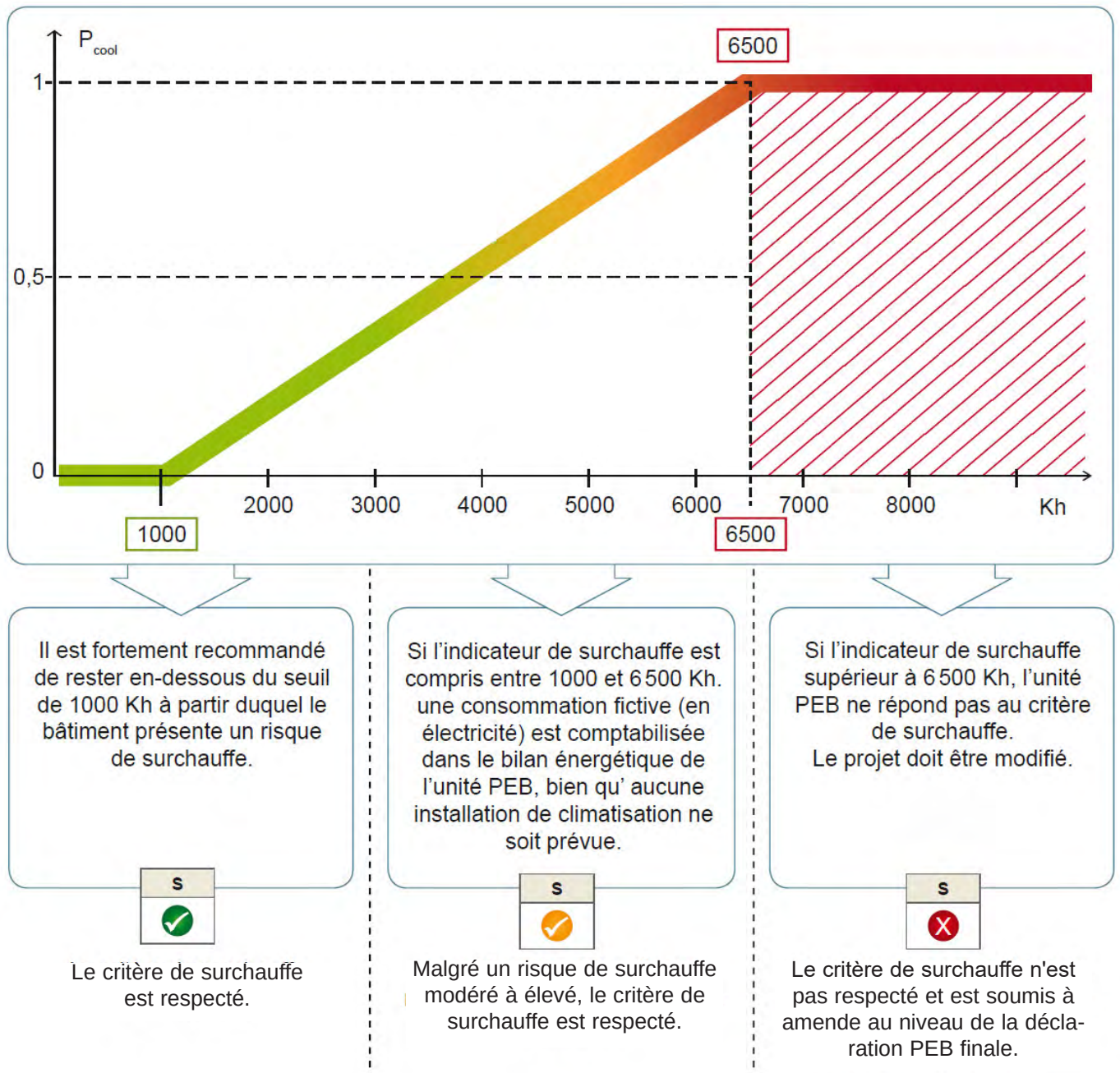
Les **apports internes** sont très importants dans le tertiaire et ce, de manière pas forcément constante ou prévisible. Pour rappel (voir tableau p. 8), un adulte assis au repos produit 110 W et, assis en travaillant modérément, 145 W ; s'il est debout et travaille activement, il produit 230 W. On imagine plus aisément la quantité de chaleur produite par un groupe d'étudiants dans un auditoire et la difficulté de régulation de cette chaleur produite en sachant qu'un auditoire n'est pas utilisé de manière constante. Pour les auteurs de projet, il est plus difficile d'évaluer les apports internes d'un bâtiment que les apports solaires.

Dans le cadre de la PEB, l'indicateur de surchauffe pour le résidentiel constitue un critère déterminant. Il est égal aux gains de chaleur annuels normalisés excédentaires par rapport à la température de consigne du chauffage pour le secteur énergétique étudié. Il est défini par secteur énergétique, et son unité de mesure est le Kelvin-heure (Kh).

L'indicateur de surchauffe dans les unités PER est fonction :

- des gains solaires par les parois vitrées ;
- de la ventilation intensive suite à l'encodage des surfaces de fenêtres ouvrantes ;
- des gains internes représentés par une valeur forfaitaire basée sur le volume protégé ;
- des pertes par transmission suite au calcul du niveau d'isolation thermique globale K ;
- de l'inertie thermique par unité PEB (de légère à lourde), comme explicité en page 44 ;
- des pertes par ventilations (selon le système de venti-

lation encodé à la demande ou pas, et s'il y a présence d'un pré-refroidissement).



La température de référence considérée pour la surchauffe est de **23°C**.

Si aucun refroidissement actif n'est installé, et si le risque de surchauffe n'est pas nul, une consommation fictive est calculée et prise en compte dans les besoins énergétiques.

Pour ce qui concerne les bâtiments non résidentiels, l'indicateur de surchauffe n'apparaît pas comme un critère réglementaire en tant que tel, mais l'impact des apports solaires et internes est bien pris en compte dans la méthode de calcul de la consommation d'énergie primaire du bâtiment. Au niveau de l'inertie, l'encodage sera soit

LES PRINCIPES ET OUTILS DE CONCEPTION

réalisé par défaut, soit par un encodage simplifié ou détaillé. En d'autres mots, l'inertie des différentes parois pourra être plus ou moins détaillée.

En conclusion, si, actuellement, l'isolation contre le froid est parfaitement maîtrisée dans nos régions ; la surchauffe est, par contre, une problématique assez nouvelle dans l'acte de bâtir.

L'architecte doit, dès la conception d'un bâtiment, prendre cette problématique en compte en adaptant l'orientation du bâtiment et le principe constructif et en choisissant des vitrages et des protections solaires adéquats. Dans les bâtiments tertiaires, la surchauffe peut être rapidement excessive à cause des gains internes qui sont généralement élevés. Des mesures actives sont dans ce cas parfois inévitables.

LES SYSTÈMES

Depuis le 1er mai 2016, des exigences s'appliquent aux systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de climatisation et de ventilation, conformément au tableau ci-dessous.

Elles sont détaillées dans l'Annexe C4 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2].

Travaux soumis à permis ou non		Performance	Calorifugeage	Comptage énergétique
Bâtiments existants	Installation	Exigence systèmes – Annexe C4		
	Modernisation Remplacement	- Chaudières gaz - Chaudières mazout - Pompes à chaleur - Chauffage électrique direct - ECS électrique - Machines à eau glacée - Récupérateur de chaleur	- Conduites d'eau chaude - Conduites d'eau glacée - Conduits d'air	- Comptage par installation - Comptage entre bâtiments - Comptage entre unités PEB
Bâtiments à construire et assimilés ⁽²⁾	Installation	–	–	Uniquement ⁽¹⁾ : - Comptage entre bâtiments - Comptage entre unités PEB

(1) il s'agit des points 1.6.2.3, 1.6.3.4, 2.3.2.2. et 2.3.2.3. de l'Annexe C4 (fourniture de chaleur ou de froid à plusieurs bâtiments ou à plusieurs unités PEB dans un même bâtiment).

(2) voir la définition des bâtiments assimilés aux bâtiments neufs, en page 61.

LES ÉTAPES DE CONCEPTION

L'organigramme de la page suivante rappelle l'importance de se poser les bonnes questions au bon moment lors de l'élaboration d'un projet pour éviter des retours en arrière perturbateurs.

En ce qui concerne les aspects liés à l'URE, la prise en compte de ceux-ci dès le choix du site jusqu'à la rédaction du cahier des charges et le contrôle de chantier a une influence non négligeable sur la conception, sur l'expression architecturale et sur les détails architectoniques.

Au bout du compte, la qualité globale en dépend.

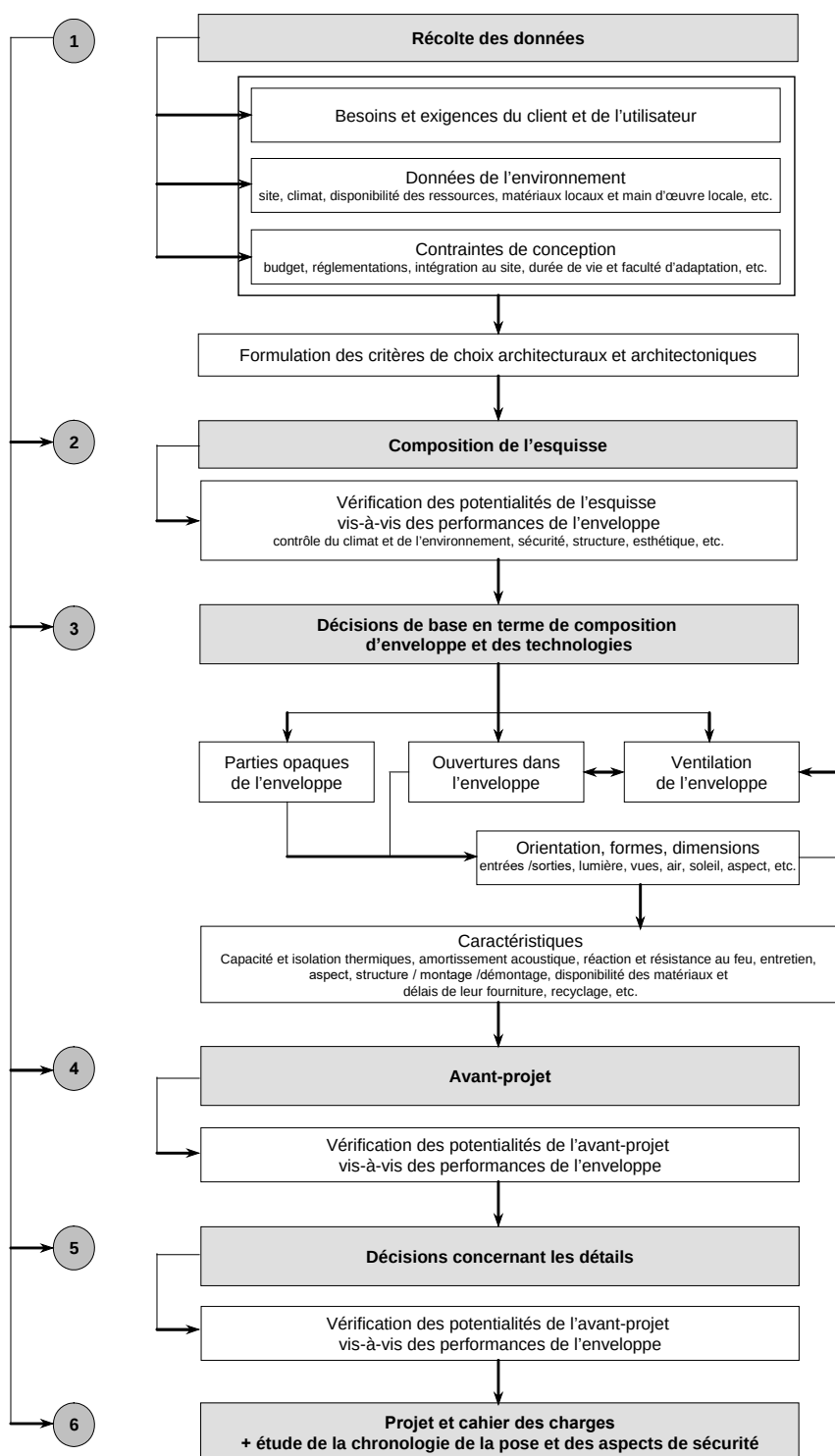
On l'a vu, la structuration des espaces répond déjà à des préoccupations URE.

La composition des parois, les rapports entre les pleins et les vides, la modulation des châssis et leur constitution, sont autant de facteurs de composition influencés par les considérations URE.

Les modes constructifs des parois et leurs jonctions assurant la continuité des performances hygrothermiques de l'enveloppe doivent être pensés dès l'avant-projet pour assurer la qualité du projet et de sa mise en oeuvre.

Ce va-et-vient constant entre la composition architecturale et une conception architectonique intégrant l'approche URE sera le garant d'une architecture durable.

ORGANIGRAMME



Quelque soit le cheminement propre à la créativité de chaque auteur de projet, il nous a semblé intéressant de proposer à celui-ci quelques organigrammes "aide-mémoire" en rapport avec la conception globale de l'architecture de l'enveloppe ainsi que celle de ses éléments fonctionnels.

La problématique de l'Utilisation Rationnelle de l'Energie s'y trouve particulièrement mise en exergue, ce qui est, rappelons-le, l'objectif de ce guide ainsi que de ceux qui le complètent et le précisent.

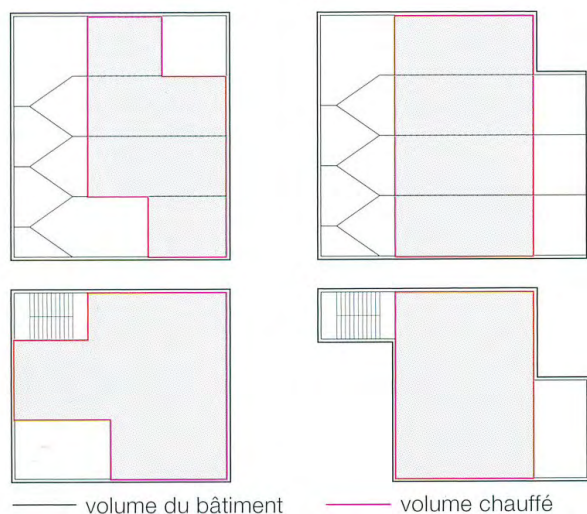
LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION

CONCEPTION GÉNÉRALE DES ESPACES CHAUFFÉS ET NON CHAUFFÉS	74
ZONAGE THERMIQUE.....	74
<i>Parois extérieures des espaces tampons.....</i>	<i>75</i>
<i>Parois de contact entre espaces tampons et volume protégé</i>	<i>75</i>
LES PLANCHERS.....	76
COMPOSITION DES PLANCHERS.....	76
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL.....	77
LES CHOIX CONCEPTUELS	78
<i>Choix de la zone 3 : zone de structure.....</i>	<i>78</i>
<i>Choix de la zone 1 : zone de revêtement de sol (aire de marche).....</i>	<i>78</i>
<i>Choix de la zone 2 : zone d'isolation.....</i>	<i>78</i>
<i>Choix des zones 4+5 : zones d'équipements et de finition intérieure.....</i>	<i>78</i>
LES FAÇADES VERTICALES.....	79
LA COMPOSITION D'UNE FAÇADE VERTICALE	79
<i>Zone 1 : zone de la peau extérieure.....</i>	<i>79</i>
<i>Zones 2 et 3 : zone de l'isolation thermique et zone de la structure.....</i>	<i>79</i>
<i>Zones 4 et 5 : zone d'équipements et zone de finition intérieure</i>	<i>79</i>
LES TYPOLOGIES DES FAÇADES VERTICALES ET LES CHOIX CONCEPTUELS.....	80
LES CHOIX CONCEPTUELS	81
LES BAIES ET LES ÉLÉMENTS TRANSLUCIDES	83
ORGANIGRAMME CONCEPTUEL.....	83
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL AU COURS DES ÉTAPES DE PROJET.....	84
LES CHOIX CONCEPTUELS	85
<i>Choix du positionnement dans la paroi opaque.....</i>	<i>85</i>
<i>Choix du type de châssis.....</i>	<i>85</i>
<i>Choix du type de vitrage</i>	<i>85</i>
<i>Choix du type de protection solaire.....</i>	<i>85</i>
LES PROTECTIONS SOLAIRES.....	86
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL.....	86
LES CHOIX CONCEPTUELS	87
LES TOITURES INCLINÉES.....	88
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL.....	88
LES CHOIX CONCEPTUELS	89
<i>Choix de la zone 1 : zone de couverture.....</i>	<i>89</i>
<i>Choix de la zone 3 : zone de structure.....</i>	<i>89</i>
<i>Choix de la zone 2 : zone d'isolation.....</i>	<i>89</i>
<i>Choix des zones 4+5 : zones d'équipements et de finition intérieure.....</i>	<i>89</i>

LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION

LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	90
CHOIX DE LA PEAU EXTÉRIEURE.....	90
CHOIX DE LA ZONE DE COUVERTURE ET DU SYSTÈME DE TOITURE.....	90
LES TOITURES PLATES.....	93
LES CHOIX CONCEPTUELS.....	93

CONCEPTION GÉNÉRALE DES ESPACES CHAUFFÉS ET NON CHAUFFÉS [HEGG-11]



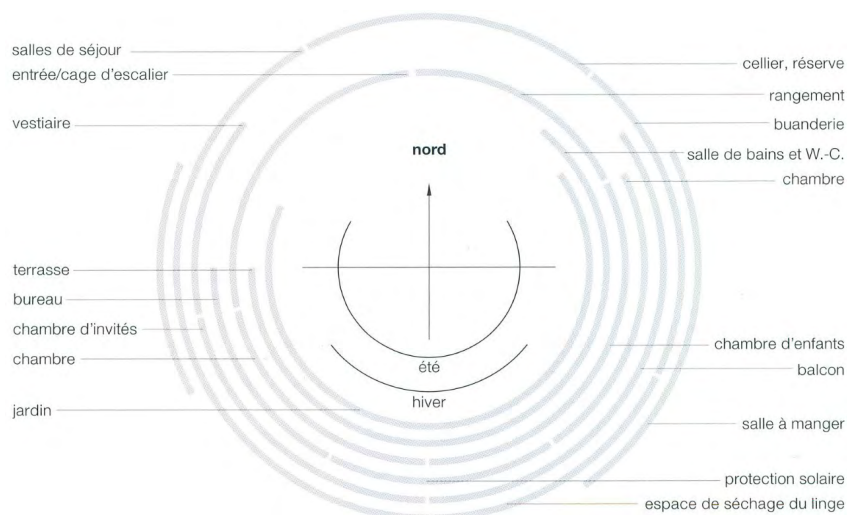
DÉLIMITATION DU VOLUME CHAUFFÉ AU SEIN DU VOLUME BRUTE [HEGG-11]

La détermination de la forme d'un bâtiment joue une grande influence sur sa demande en énergie. Le volume du bâtiment est en grande partie imposé par le programme architectural et par des considérations économiques. Une certaine latitude existe néanmoins souvent pour déterminer la surface de l'enveloppe. De grandes différences dans les surfaces d'enveloppe se répercutent immédiatement sur les déperditions thermiques : plus la surface nécessaire pour un volume donné est petite, plus la demande en énergie de chauffage du bâtiment sera réduite. Inversement, plus la surface d'enveloppe nécessaire pour un volume donné est grande, plus l'isolation thermique nécessaire devra être importante. Cette interaction est visible dès la conception ; elle peut être quantifiée par la mesure de compacité, qui a déjà été abordée précédemment.

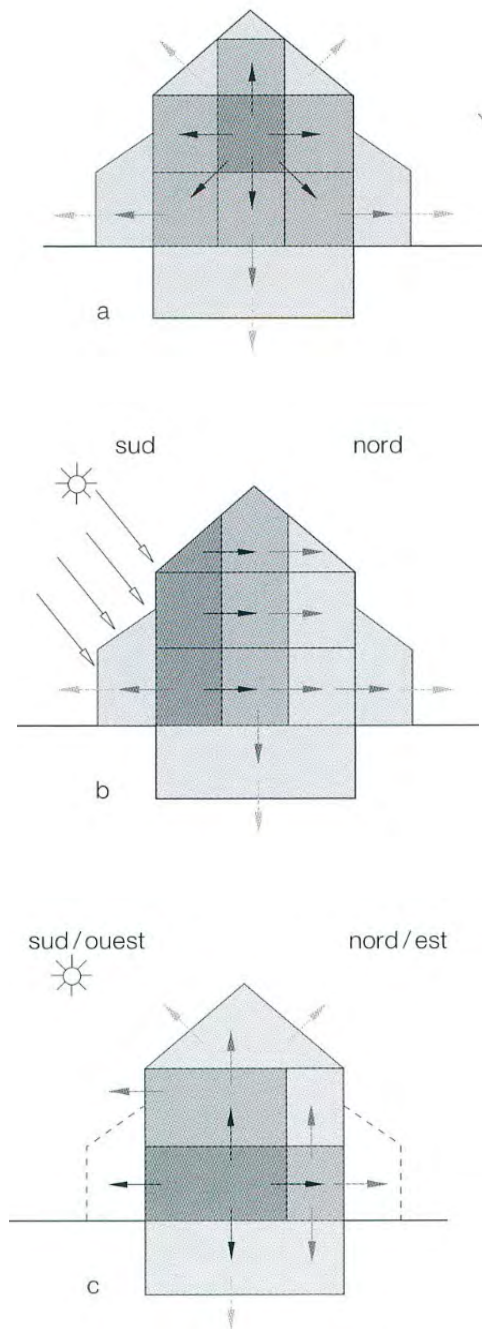
Les zones de circulation non chauffées, les locaux de rangement et de stockage, les garages ne font pas partie des locaux que l'on souhaite chauffer, et peuvent donc être séparés thermiquement du volume protégé. Du point de vue énergétique, ce n'est pas la compacité du volume brut qui est déterminante, mais bien celle du volume chauffé (voir figure ci-contre).

ZONAGE THERMIQUE

Lors de la conception en plan, répartissant les locaux spatialement, le zonage thermique représente aussi une possibilité d'optimisation énergétique. Cela suppose une répartition des surfaces utiles dans des zones différenciées d'après leurs impératifs de température, à leur demande en lumière du jour ou selon les moments de la



RÉPARTITION SPATIALE DES LOCAUX SELON LEURS EXIGENCES THERMIQUES [HEGG-11]



POSSIBILITÉS DE ZONAGE THERMIQUE
D'UN BÂTIMENT D'HABITATION [HEGG-11]

journée privilégiés par les utilisateurs. Il est évident que les zones à fortes exigences thermiques doivent être placées plutôt au sud, et que celles qui sont moins ou pas chauffées, ainsi que les pièces avec des charges thermiques internes élevées, servent d'espace tampon en étant situées en partie nord (voir figure page précédente).

En outre, une disposition réfléchie en zones sans exigences de température peut optimiser le bâtiment sur le plan énergétique. Des locaux annexes non chauffés, mais aussi des enveloppes vitrées complémentaires, permettent d'atteindre cet objectif. L'idée de base est toujours la même : créer entre l'intérieur et l'extérieur un espace intermédiaire exclusivement chauffé par le rayonnement solaire qui produit des températures supérieures à celle de l'air extérieur. Les déperditions thermiques par transmission sont ainsi réduites, et les activités principales sont thermiquement protégées par des espaces-tampons.

Pour les bâtiments à forte demande thermique (comme les bâtiments d'habitation), on distingue 3 possibilités de zonage (voir figures ci-contre) :

- Zonage concentrique (a) : il permet de grandes profondeurs de bâtiment ; ou regroupe, dans le noyau du bâtiment, les zones à protéger sur le plan climatique et qui nécessitent une ambiance thermique constante ;
- Zonage linéaire (b) : il joue sur l'orientation par rapport au soleil. Les pièces à forte demande de lumière et de chaleur sont orientées au sud, à l'est et à l'ouest ; les pièces qui ont moins besoin d'être chauffées, ou chauffées de façon discontinue, se retrouvent au nord ;
- Zonage par étage (c) : les pièces à fortes exigences thermiques sont en général regroupées au centre du bâtiment.

PAROIS EXTÉRIEURES DES ESPACES TAMPONS

Il est recommandé de soigner l'étanchéité à l'air des espaces tampons, d'isoler thermiquement leurs parois extérieures, en d'utiliser des vitrages isolants pour leur peau vitrée extérieure, même s'ils sont non chauffés, et surtout s'ils sont utilisables, de manière à s'assurer qu'ils s'interposeront efficacement entre l'ambiance extérieure et le volume protégé.

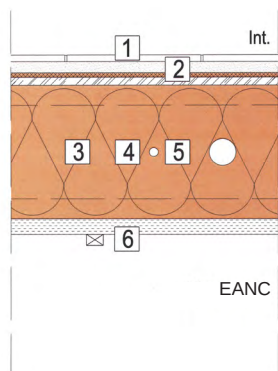
PAROIS DE CONTACT ENTRE ESPACES TAMPONS ET VOLUME PROTÉGÉ

De même, la séparation entre l'espace tampon et le volume protégé doit également comporter une isolation thermique efficace, d'autant plus si l'espace tampon est séparé de l'extérieur par des parois majoritairement vitrées. Si la séparation thermique entre l'espace tampon et le volume protégé n'est pas excellente, le volume protégé englobera l'espace tampon, et la peau séparant les ambiances intérieure et extérieure se déplacera à la peau extérieure de l'espace tampon, qui cessera donc de fonctionner en tant que tampon, ce qui fait perdre l'objectif recherché.

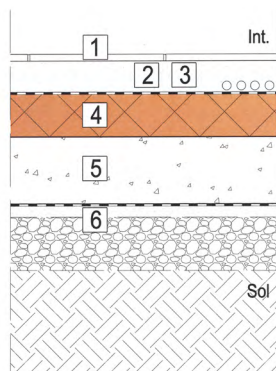
LES PLANCHERS

Un guide spécifique n'a pas été consacré au sujet des planchers. Cependant le lecteur est invité à consulter le Guide pratique "La rénovation et l'énergie" [HAUG-17-5]

COMPOSITION DES PLANCHERS



**PLANCHER BOIS EN
POUTRES I SUR EANC**



DALLE BÉTON SUR SOL

Les couches de matériaux qui composent un plancher correspondent à des zones fonctionnelles, à savoir :

Zone 1 = zone de finition supérieure (aire de marche) ;

Zone 2 = zone de support de la finition ;

Zone 3 = zone d'équipements ;

Zone 4 = zone d'isolation ;

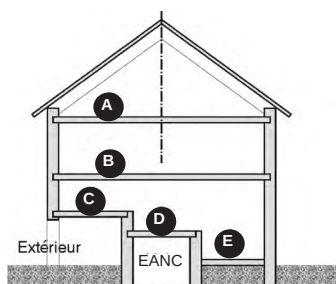
Zone 5 = zone de support structurel ;

Zone 6 = zone de finition inférieure.

Le tableau ci-dessous commente les choix possibles, obligés ou interdits.

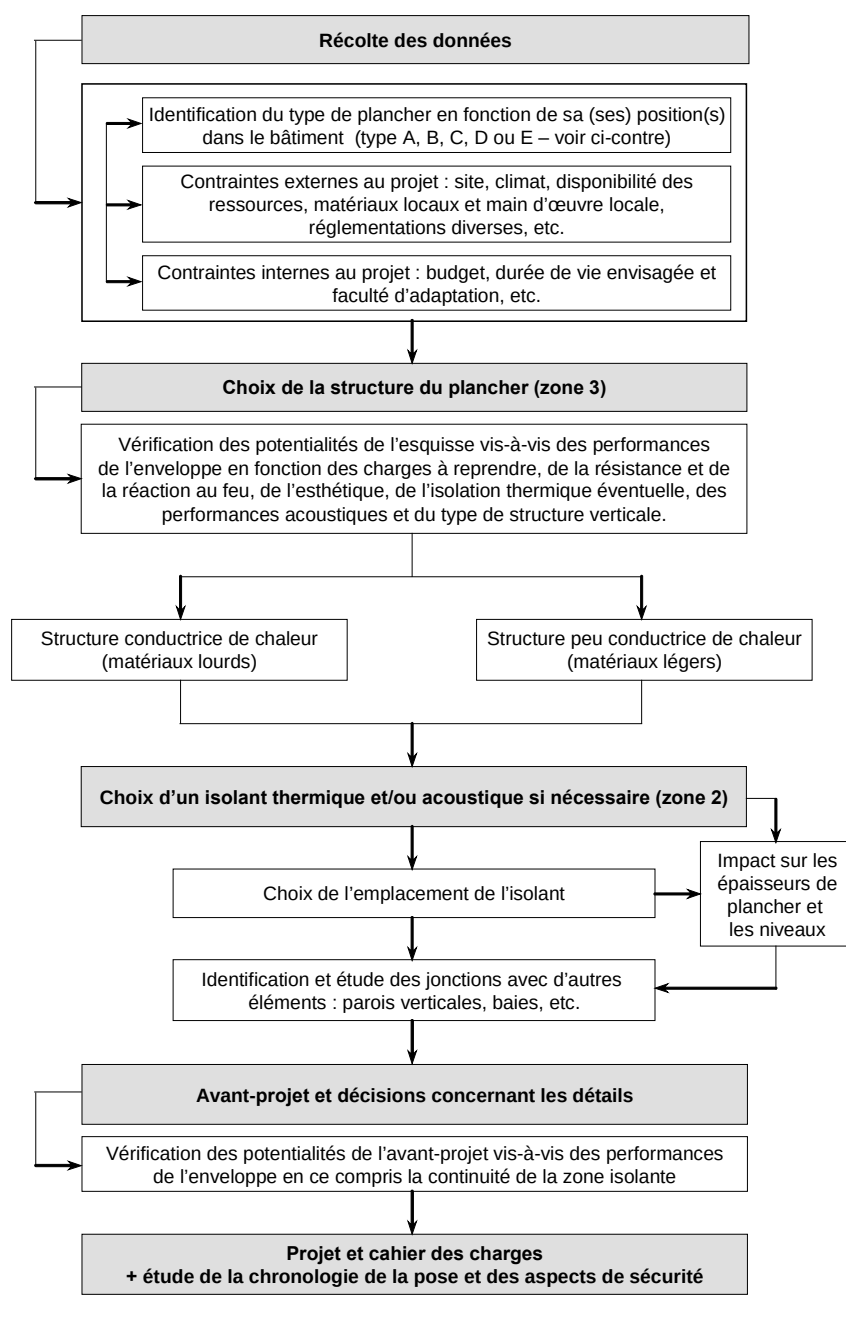
ZONE	FONCTIONS	PLAFONDS		PLANCHERS	
		DALLE PLEINE	GÎTAGE	DALLE PLEINE	GÎTAGE
Zone 1	Finition supérieure	non nécessaire si sous un EANC (Espace Adjacent Non Chauffé)		revêtement de sol	
		si mitoyenne, la paroi devient à la fois plafond et plancher			
Zone 2	Support de la finition	- non nécessaire si EANC - si mitoyenne, la paroi devient à la fois plafond et plancher		- chape en béton - chape sèche - lambourdes en bois	
Zone 3	Techniques spéciales	si EANC, il faut éviter de sortir les techniques du volume protégé		possibilité de noyer les techniques spéciales dans la chape humide	
		situées sous la zone 6	situées sous la zone 6 ou dans zone 5	possibilité de placer les techniques spéciales entre les lambourdes	
	Chauffage sol	néant		possibilité de placer le chauffage sol sous (ou dans) la chape humide ou une chape sèche spécifique	
Zone 4	Isolation thermique	sur (ou sous) zone 5		sur (ou sous) zone 5	
Zone 5	Support structurel	dalle béton autoportante	plancher (gîtes bois ou I)	dalle béton autoportante	plancher (gîtes bois ou I)
		poutres-claveaux en béton	poutres-claveaux en métal	poutres-claveaux en béton	poutres-claveaux en métal
		hourdis		hourdis	
		dalle en bois contre-collé		dalle en bois contre-collé	
		voûtes, voussettes		voûtes, voussettes	
Zone 6	Finition intérieure	- plâtre - plaques de plâtre - lambris		néant	panneau de propreté

ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL



CLASSEMENT DES PLANCHERS SELON LEUR POSITION DANS LE BÂTIMENT

- A = Plancher de grenier.
- B = Plancher entre locaux chauffés et habités d'un même logement ou plancher entre locaux chauffés entre 2 logements différents.
- C = Plancher en contact direct avec l'extérieur (par exemple plancher au-dessus d'un passage ou en surplomb).
- D = Plancher surmontant un espace ventilé ou cave non chauffée (vides ventilés, caves, pièces d'habitation).
- E = Plancher en contact direct avec le sol sur terre-plein.



1

2

3

4

5

LES CHOIX CONCEPTUELS

CHOIX DE LA ZONE 3 : ZONE DE STRUCTURE

On peut distinguer deux grands types de planchers en fonction de la nature de leur structure vis-à-vis de la conduction de chaleur :

- les planchers à structure conductrice de chaleur (matériaux lourds) ;
- les planchers à structure peu conductrice de chaleur (matériaux légers).

Selon la nature de la structure du plancher (lourde ou légère) et la qualité de mise en oeuvre de l'isolation thermique, on sera confronté plus ou moins facilement à des risques de ponts thermiques.

Des précautions particulières sont donc à prendre en fonction de la structure.

CHOIX DE LA ZONE 1 : ZONE DE REVÊTEMENT DE SOL (AIRE DE MARCHÉ)

Sur certains planchers, une sensation désagréable de froid peut se faire ressentir au contact du sol (notamment par les pieds). Cela dépend, d'une part, de la température superficielle ou température du plancher et, d'autre part, de la nature du plancher et de son revêtement.

CHOIX DE LA ZONE 2 : ZONE D'ISOLATION

Les types de plancher sont différenciés selon la disposition constructive, confondant ainsi les planchers sur vides ventilés et ceux sur caves.

Il faut bien noter que, même si le mode d'isolation thermique reste semblable, la performance de résistance thermique à atteindre est moins sévère pour les planchers sur caves que pour ceux sur vides ventilés, considérés comme des espaces non chauffés non à l'abri du gel.

CHOIX DES ZONES 4+5 : ZONE D'ÉQUIPEMENTS ET DE FINITION INTÉRIEURE

Dans le cas d'un plancher lourd, cette zone se situe de préférence entre la structure et la zone de marche.

Les installations techniques sont (idéalement pour le chauffage) placées côté chaud de l'habitation.

Dans le cas d'un plancher léger, cette zone peut s'intégrer entre les éléments de structure. Dans ce cas-ci, il faudra veiller à la bonne qualité de la finition ; notamment au niveau des percements, résoudre les éventuels problèmes d'acoustique.

REMARQUE

Aux appuis dans une paroi humide, sièges de ponts thermiques, il pourrait y avoir de la corrosion ou un développement d'agents pathogènes (par ex. champignons), et, de ce fait, avoir des conséquences catastrophiques sur la stabilité du plancher.

L'annexe 3 donne au lecteur une explication plus complète concernant la notion de "chaud aux pieds" ainsi que la définition de termes tels que "effusivité thermique", "chaleur subjective".

REMARQUES

- Nous rappelons que l'isolation par l'extérieur d'un plancher lourd favorise la contribution de celui-ci à l'inertie thermique du bâtiment.
- Les principes énoncés en page 69 du guide de la rénovation [e] sont valables en nouvelle construction. Nous invitons donc le lecteur à consulter cette information.

POUR MÉMOIRE

Outre la réalisation de surfaces horizontales, les fonctions principales des planchers sont les suivantes :

- report sur les murs porteurs des charges agissant sur eux : charges réparties (poids propre, ...), charges ponctuelles (cloisons, équipements,...) ;
- la reprise de certains efforts horizontaux par tirants et chaînage (liaison des murs entre eux) et le contreventement horizontal du bâtiment ;
- l'isolation thermique pour les planchers en contact avec l'extérieur sur les espaces non-chauffés ;
- l'isolation acoustique aux bruits aériens et d'impact.

LES FAÇADES VERTICALES

LA COMPOSITION D'UNE FAÇADE VERTICALE

Chaque typologie de façade est divisée en cinq zones (de 1 à 5) reprises dans l'organigramme de la page 64 :

- 1 = zone de la peau extérieure ;
- 2 = zone de l'isolation thermique ;
- 3 = zone de la structure ;
- 4 = zone d'équipements ;
- 5 = zone de finition.

ZONE 1 : ZONE DE LA PEAU EXTÉRIEURE

La peau extérieure est la face vue de la partie extérieure de la paroi de façade.

Sa perméabilité à la vapeur d'eau et son degré d'absorption de l'eau de précipitation influencent fortement la conception de la zone de l'isolation thermique.

Elle est également déterminante pour la perception et la composition architecturale.

ZONES 2 ET 3 : ZONE DE L'ISOLATION THERMIQUE ET ZONE DE LA STRUCTURE

L'enveloppe d'un bâtiment doit isoler l'environnement intérieur, de l'environnement extérieur.

Le comportement hygrothermique de la paroi dépend de la zone d'isolation thermique. De même, le programme architectural et le type d'occupation des locaux peuvent induire un comportement hygrothermique qui, lui-même, soutend une composition de paroi.

La zone de structure est porteuse des charges des planchers et toitures et stabilisatrice du bâtiment.

Elle reprend évidemment sa charge propre et aide éventuellement à la reprise des charges de la partie extérieure de la paroi qu'elle stabilise.

La perméabilité à la vapeur d'eau du matériau isolant doit être confrontée à la perméabilité de la peau extérieure (zone 1) et de la peau intérieure (zone 5) pour que le transfert de vapeur se fasse harmonieusement.

ZONES 4 ET 5 : ZONE D'ÉQUIPEMENTS ET ZONE DE FINITION INTÉRIEURE

Lorsque la zone d'équipements existe, elle est généralement intégrée à une autre zone (zone 2 ou 3 ou 5).

cet espace qui ne peut communiquer avec ceux des plafonds et des étages, est réservé au passage des divers équipements : électricité, câblages divers, canalisations, etc.

LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION

Le choix de la zone de finition se fait selon :

- l'aspect souhaité de la finition intérieure ;
- la nécessité de participer ou non à l'étanchéité à la vapeur d'eau de la paroi ;
- la performance acoustique souhaitée ;
- l'entretien ;
- la résistance et la réaction au feu.

LES TYPOLOGIES DES FAÇADES VERTICALES

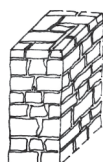
L'organigramme de la page suivante donne une chronologie des choix que l'auteur de projet doit faire lors de la conception d'une façade verticale.

Nous avons déterminé une typologie de paroi différenciée selon le comportement hygrothermique. On peut ainsi, classer les parois de façades en quatre grandes catégories reprises dans le tableau ci-dessous. **Chacun de ces types de façade peut, en variant, être recouvert d'un bardage ventilé.**

- 1 Zone de la peau extérieure
- 2 Zone de l'isolation thermique
- 3 Zone de la structure
- 4 Zone d'équipements
- 5 Zone de finition

TYPE A : PAROI MONOLITHIQUE "AUTO-ISOLANTE" (MUR PLEIN)

A

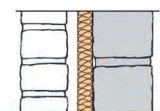
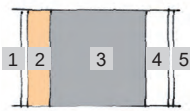


MAÇONNERIE EN MOELLONS

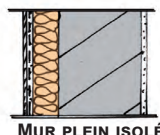
- Zone 1 : éventuelle
- Zone 2 : inexistante (la résistance thermique de la zone 3 doit alors suffire)
- Zone 3 : si les dispositions sont appropriées, elle peut remplir tous les rôles.
- Zone 4 : éventuelle
- Zone 5 : éventuelle

TYPE B : PAROI MULTICOUCHE AVEC UNE ZONE D'ISOLATION THERMIQUE

B₁



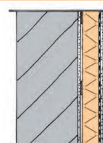
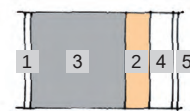
MUR CREUX ISOLÉ



MUR PLEIN ISOLÉ PAR L'EXTÉRIEUR

- Zone 1 : indispensable
- Zone 2 : nécessaire
- Zone 3 : elle peut remplir les rôles des zones 4 et 5.
- Zone 4 : éventuelle
- Zone 5 : éventuelle

B₂

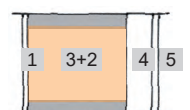


MUR PLEIN ISOLÉ PAR L'INTÉRIEUR

- Zone 1 : éventuelle
- Zone 2 : nécessaire
- Zone 3 : elle peut remplir le rôle de la zone 1 si elle est imperméable à l'eau.
- Zone 4 : éventuelle
- Zone 5 : indispensable

TYPE C : PAROI MULTICOUCHE AVEC UNE ZONE D'ISOLATION THERMIQUE INTÉGRÉE À LA STRUCTURE TRAVERSANTE

C

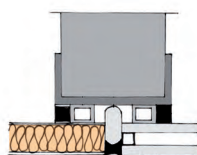
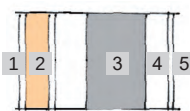


PAROI À OSSATURE BOIS ISOLÉE

- Zone 1 : indispensable
- Zone 2 : nécessaire et intégrée dans la zone 3 ; elle peut remplir le rôle de la zone 4
- Zone 3 : elle peut remplir le rôle de la zone 4
- Zone 4 : éventuelle
- Zone 5 : indispensable

TYPE D : PAROI CONSTITUÉE D'UNE ISOLATION THERMIQUE ENTRE 2 FEUILLES, ACCROCHÉE À LA STRUCTURE (MUR RIDEAU)

D



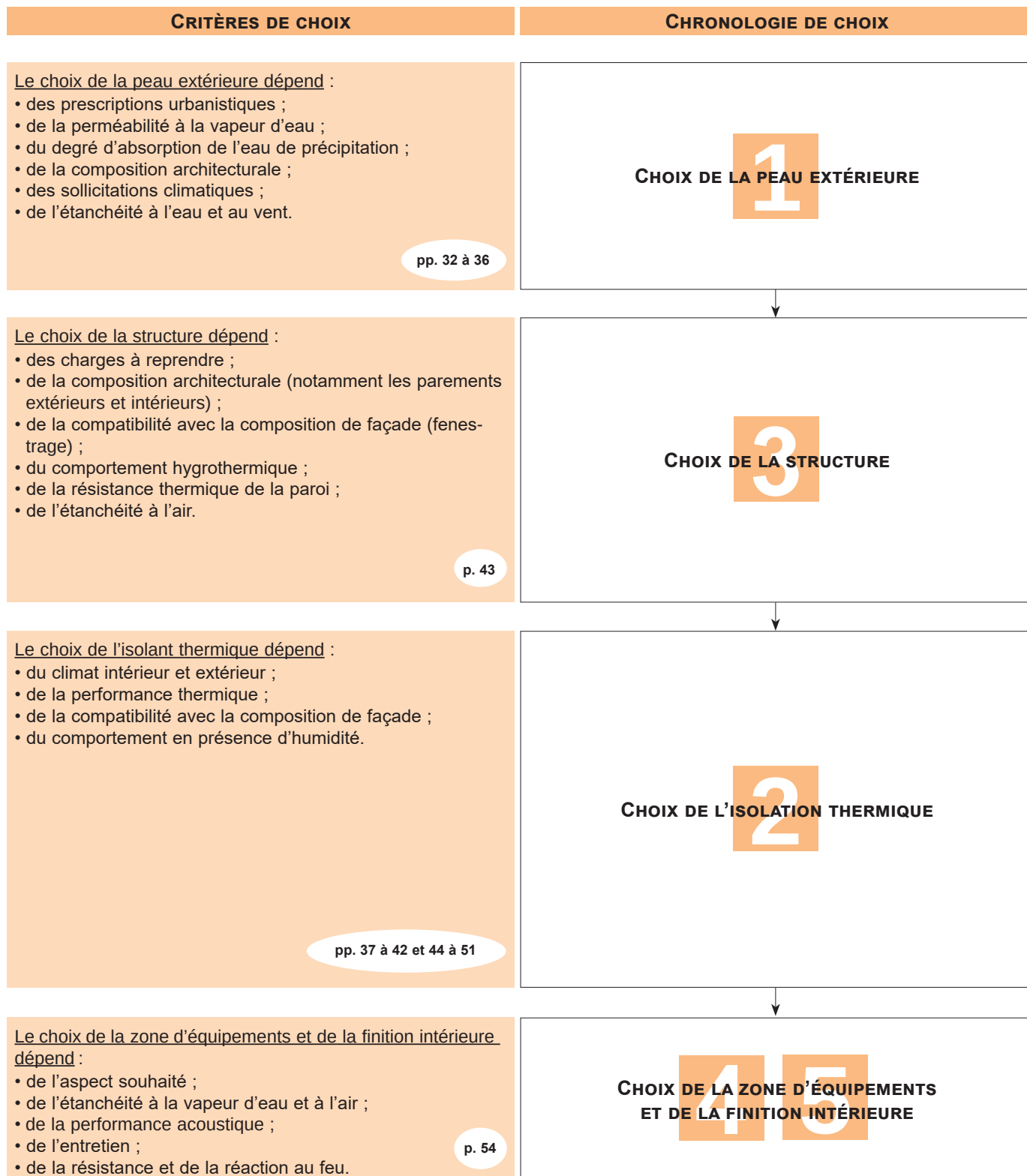
MUR RIDEAU

- Zone 1 : indispensable (mais peut être la peau extérieure du panneau sandwich)
- Zone 2 : elle peut comprendre la zone 1 et remplir le rôle de la zone 5
- Zone 3 : elle peut remplir le rôle des zones 4 et 5
- Zone 4 : éventuelle
- Zone 5 : éventuelle

Le lecteur est invité à consulter l'ouvrage "L'isolation thermique des murs - Guide pratique pour les architectes" [HAUG-17-1], paru dans la même collection.
Les références de pages reprises dans l'organigramme ci-dessous correspondent aux pages du guide précité.

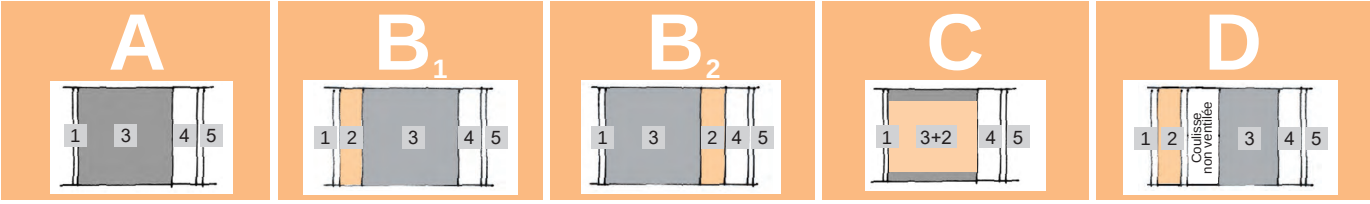
LES CHOIX CONCEPTUELS

La chronologie des choix explicités ci-dessous concerne toutes les typologies de façade, A, B₁, B₂, C et D.



LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION

OBLIGATIONS / INCOMPATIBILITÉS



- Si la zone 1 est imperméable à la vapeur d'eau et qu'il n'y a pas de coulisse ventilée ou drainée, il faut un pare-vapeur côté intérieur.
- La zone 1 doit être étanche s'il n'y a pas de coulisse ventilée ou drainée.
- Si la zone 1 est perméable à l'air, il faut un enduit intérieur qui assure l'étanchéité à l'air.
- La peinture ne réalise pas une étanchéité.
- Les hydrofuges de surface n'assurent pas une étanchéité mais ils retardent la saturation.
- Les enduits sont étanches à l'eau et doivent être perméables à la vapeur d'eau. Ils nécessitent un entretien tous les 10-15 ans.
- Dans le cas d'un bardage, il faut évacuer l'eau au pied de la paroi.
- Une maçonnerie de parement n'offre pas une étanchéité à l'eau totale.

- Il faut des joints d'étanchéité performants.

- Seuls les blocs de béton cellulaire très légers avec une épaisseur ≥ 40 cm et dans un état sec, offrent une performance thermique satisfaisante.
- Les murs en moellons ne sont pas étanches aux pluies battantes.
- Les murs monolithiques récents doivent être revêtus d'une peau extérieure étanche.

- Le mur porteur doit être sec.
- Il faut une barrière d'étanchéité contre l'humidité ascensionnelle.
- Attention : l'isolation thermique posée à l'intérieur soumet la structure aux mouvements thermiques.

- La structure est complétée par un contreventement.

- Les panneaux d'isolants doivent être posés de manière jointive.
- L'isolant doit être protégé de l'eau de pluie.
- Le polystyrène expansé EPS résiste mal au feu.
- La laine minérale LW et la laine de verre GW sont perméables à la vapeur d'eau et à l'air.
- Le verre cellulaire CG est étanche à la vapeur d'eau et à l'eau. Il est imperméable à l'air. Il nécessite un support régulier et rigide.

- Si l'isolant est perméable à l'air, le support doit être étanche à l'air.

- Il faut soit un isolant peu perméable à la vapeur d'eau (PS, PUR, PSE, CG), soit un pare-vapeur côté intérieur, du côté chaud de l'isolant.

- Il faut un pare-vapeur continu du côté intérieur.
- L'isolant est semi-rigide ou insufflé.
- Il faut éviter toute convection d'air.
- Si structure métallique, il faut une coupure thermique (par exemple, isolation continue recouvrant l'ossature).

- Si paroi vitrée, il faut des vitrages performants thermiquement.
- L'isolant doit être :
 - incombustible ;
 - résistant à la corrosion ;
 - non absorbant d'humidité ;
 - léger ;
 - résistant au fléchissement et au tassement.

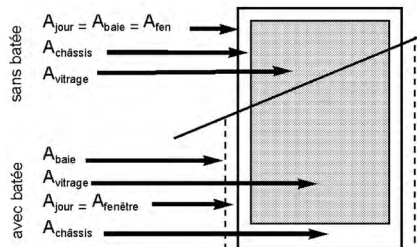
- Si la zone 1 est perméable à l'air, il faut un enduit intérieur pour assurer l'étanchéité à l'air.
- L'espace technique ne peut communiquer avec ceux des plafonds et des étages.
- Il ne faut pas encastrier des conduites ou finitions qui percent le pare-vapeur éventuel.

- La finition intérieure doit être étanche à l'air. Dans le cas contraire, il faut un pare-vapeur continu.

LES BAIES ET LES ÉLÉMENTS TRANSLUCIDES

Le lecteur est invité à consulter l'ouvrage *“La fenêtre et la gestion de l'énergie - Guide pratique pour les architectes”* [HAUG-17-4] paru dans la même collection.

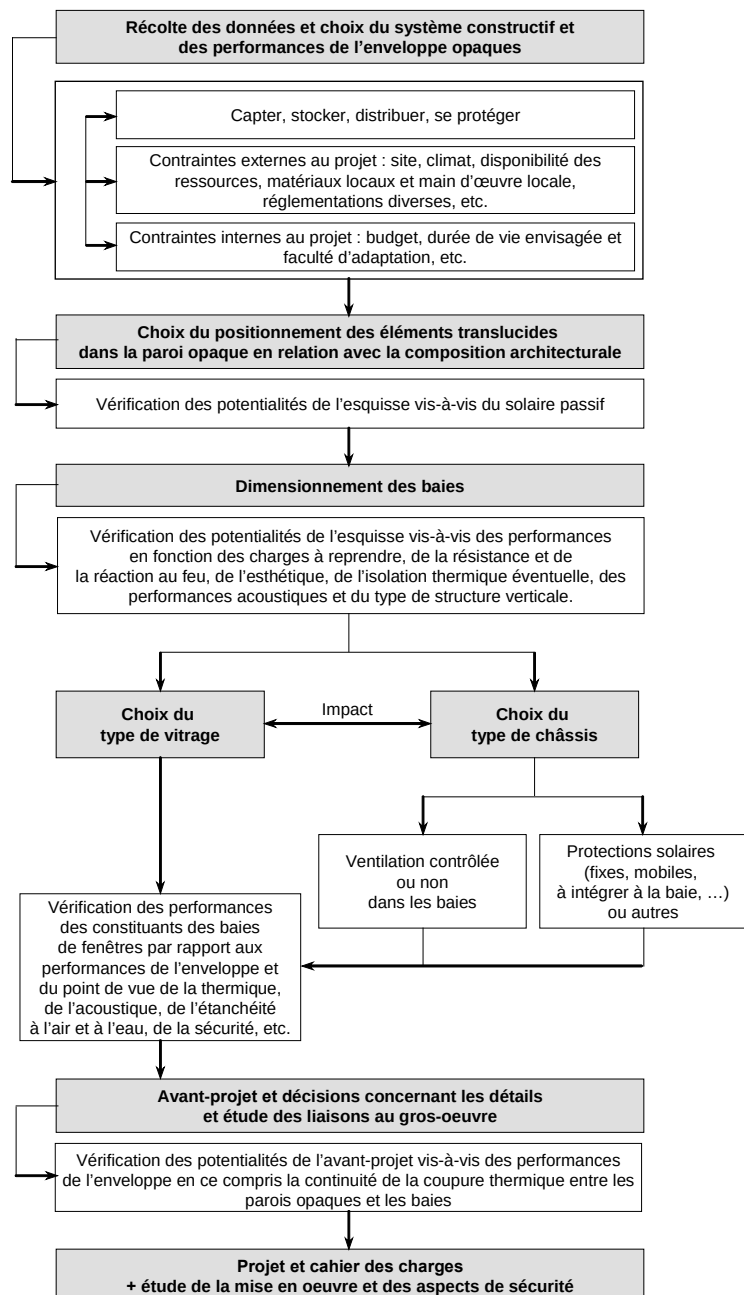
DÉFINITION DES AIRES VUES SOUS L'ANGLE DE LA THERMIQUE



Les éléments influençant le bilan thermique de la baie de fenêtre sont :

- 1 = l'orientation et l'inclinaison de la fenêtre ;
- 2 = la surface de la baie et la proportion entre surface jour du vitrage et partie vue extérieure du châssis ;
- 3 = les pourtours de la baie ;
- 4 = les “accessoires” (par exemple les protections).

ORGANIGRAMME CONCEPTUEL



1

2

3

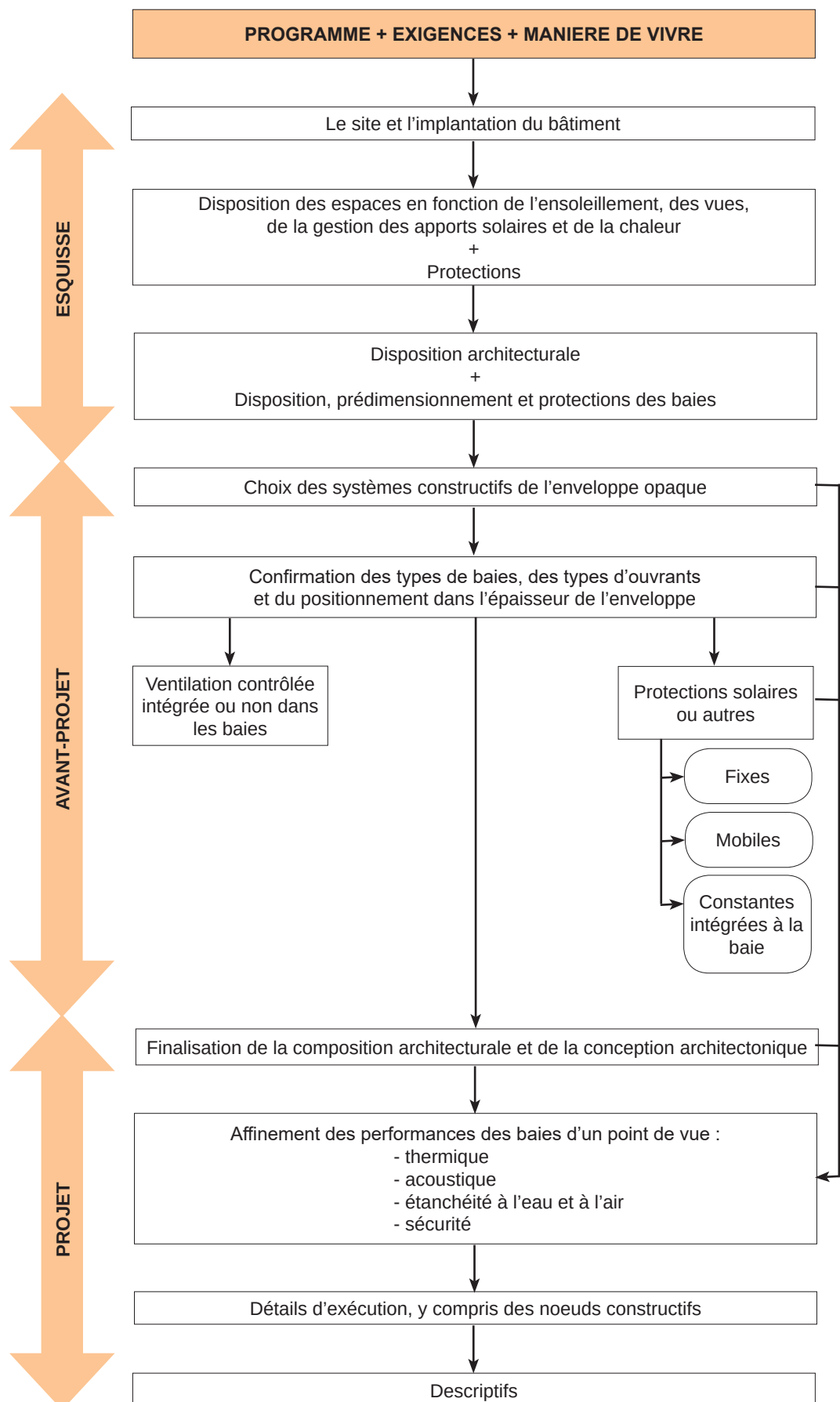
4

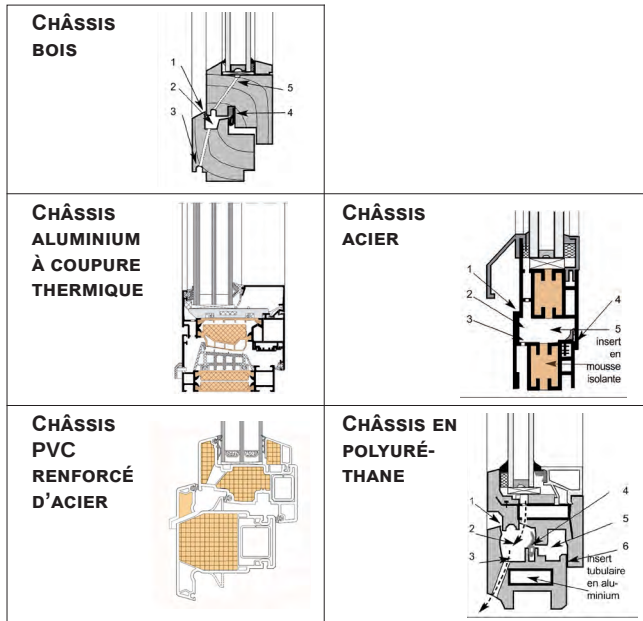
5

6

LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION

ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL AU COURS DES ÉTAPES DE PROJET





REMARQUE SUR LE TYPE D'OUVRANT

Sans oublier l'aspect utilitaire (déménagement, entretien...) des ouvrants, rappelons que la forme, le type de fenêtre, les divisions et leur position influencent le comportement et la résistance structurelle aux intempéries ainsi que le coefficient de transmission thermique U.

LES CHOIX CONCEPTUELS

CHOIX DU POSITIONNEMENT DANS LA PAROI OPAQUE

Décidé dès les premiers instants de conception, le positionnement des baies va jouer un rôle essentiel pour permettre la vie à l'intérieur en amenant lumière, soleil et vues.

Disposer judicieusement les éléments translucides dans l'enveloppe, agencer les espaces et choisir les matériaux sont autant de facteurs qui permettent d'augmenter le confort et de gérer, de façon passive, les besoins en énergie.

CHOIX DU TYPE DE CHÂSSIS

Les performances du châssis dépendent notamment des nombreuses contraintes imposées par l'architecture (design, entretien,...), l'urbanisme et le matériau lui-même. Le choix du type de châssis doit se faire en fonction de ses principales parties (le dormant, l'ouvrant, la double barrière d'étanchéité, la chambre de décompression, les exutoires de drainage de la chambre de décompression, la feuillure et la parclose) mais également en fonction du niveau de transmission thermique U ainsi que du niveau d'isolation acoustique nécessaire.

CHOIX DU TYPE DE VITRAGE

Les types de verre et de vitrage proposés sur le marché sont nombreux et possèdent tous des performances différentes tant au point de vue des transmissions lumineuse et acoustique que d'un point de vue physico-mécanique (résistance aux sollicitations diverses comme le climat, le feu, les impacts,...).

Bien que les vitrages tendent à devenir de plus en plus polyvalents, choisir un vitrage nécessite une interrogation précise quant aux besoins.

Va-t-on privilégier l'aspect thermique, acoustique ou de sécurité ?

CHOIX DU TYPE DE PROTECTION SOLAIRE

Les protections solaires sont abordées ci-après.

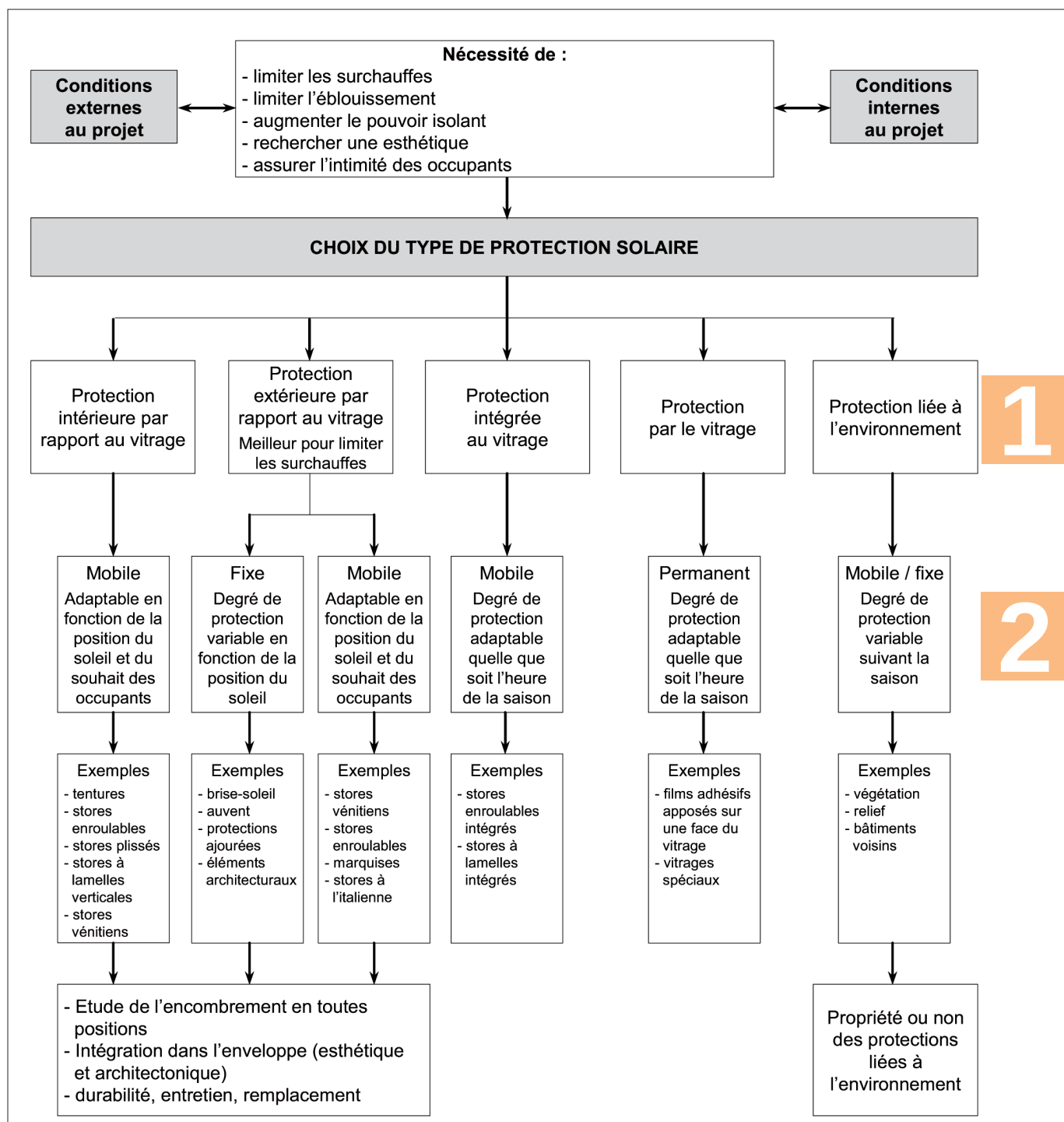
LES PROTECTIONS SOLAIRES

Le lecteur est invité à consulter l'ouvrage *"La fenêtre et la gestion de l'énergie - Guide pratique pour les architectes"* [HAUG-17-4] paru dans la même collection.

Il existe plusieurs types de protections dont les performances sont influencées par :

- la position de la protection par rapport à la baie ou à la fenêtre ;
- le type.

ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL



Pour plus d'information nous invitons le lecteur à consulter "Choisir une protection solaire" [ARCH-97]

LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION

LES CHOIX CONCEPTUELS

Se protéger contre le soleil peut se faire de différentes manières : on peut choisir un vitrage à faible facteur solaire, ou utiliser une protection solaire fixe, mobile ou évolutive. Le tableau ci-dessous [ARCH-97] compare les performances des principaux types de protections solaires.

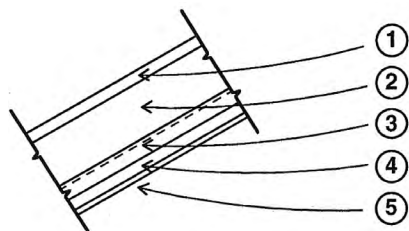
TYPES DE PROTECTION		Efficacité contre les surchauffes	Efficacité contre l'éblouissement	Apport en éclairage naturel	Pouvoir d'isolation thermique	Résistance aux contraintes mécaniques	Modularité par rapport aux besoins	Ventilation intensive	Placement en rénovation	Intimité des occupants «privacy»
PROTECTIONS EXTERIEURES	Brise-soleil	++	++	++	--	++	+/-	++	+/-	--
	Stores vénitiens	++	++	+	--	+	++	++	+	+
	Stores enroulables	++	++	+/-	-	-	++	+/-	++	++
	Éléments architecturaux	++	++	++	--	++	--	++	--	--
	Stores projetés à l'italienne	++	++	+	-	--	++	++	++	=
	Volets	++	++	+/-	-	-	++	+/-	++	++
PROTECTIONS INTERIEURES	Stores enroulables plissés en tissu	-	++	+/-	+/-	+	++	-	++	++
	Stores enroulables plissés réfléchissants	+	++	-	+	+/-	++	-	++	++
	Stores vénitiens à lamelles verticales	--	++	+/-	--	+	++	-	++	+
	Films	-- à ++	-- à ++	+/-	-- à ++	++	--	++	++	- à ++
PROTECTIONS INTÉGRÉES AU VITRAGE	Stores vénitiens	++	++	+	+	++	++	++	--	+
	Stores enroulables	++	++	-	-	++	++	++	--	++
-- Très mauvais - Mauvais +/- Moyen + Bon ++ Très bon										

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTS TYPES DE PROTECTIONS

LES PROTECTIONS FIXES	LES PROTECTIONS MOBILES	LES PROTECTIONS ÉVOLUTIVES OU ENVIRONNEMENTALES
<u>Avantages :</u> Elles protègent principalement des rayons directs du soleil sans affecter le rayonnement diffus. Elles offrent une protection très avantageuse contre le rayonnement direct estival, surtout pour les baies orientées au sud, mais ne permettent pas de lutter contre les risques d'éblouissement dus au soleil hivernal. <u>Inconvénients :</u> Aucune protection fixe ne permet de résoudre le problème propre aux façades est et ouest. <u>Remarque :</u> Certaines protections solaires peuvent évoluer dans le temps et selon les besoins grâce à un système de commande automatique ; d'autres sont fixes.	<u>Avantages :</u> Les risques d'éblouissement étant liés essentiellement à la hauteur du soleil, à l'orientation des fenêtres, à l'heure et à la saison, il est donc avantageux de pouvoir utiliser une protection solaire adéquate au moment voulu, ce qui peut être obtenu grâce à une commande optimisée. <u>Inconvénients :</u> Si elle n'est pas automatisée, une protection solaire sera difficile à gérer de façon optimale, ce qui peut nuire aux objectifs d'économie d'énergie (par exemple : électricité). Elle doit pouvoir résister au vent mais il faut malgré tout veiller à la possibilité de rester libre de modifier cette protection automatisée.	<u>Avantages :</u> La végétation à feuilles caduques s'inscrit dans cette catégorie. Elle apporte une protection qui est naturellement variable. En été : le feuillage apporte un ombrage aux fenêtres. En hiver : la chute des feuilles fait profiter les locaux des apports gratuits du soleil mais ne protège pas de l'éblouissement. <u>Inconvénients :</u> La protection est donc variable dans le temps mais indépendamment de la volonté et des besoins réels. De plus, il est illusoire de croire que la végétation défeuillée en hiver n'apporte plus aucun obstacle aux apports solaires.

LES TOITURES INCLINÉES

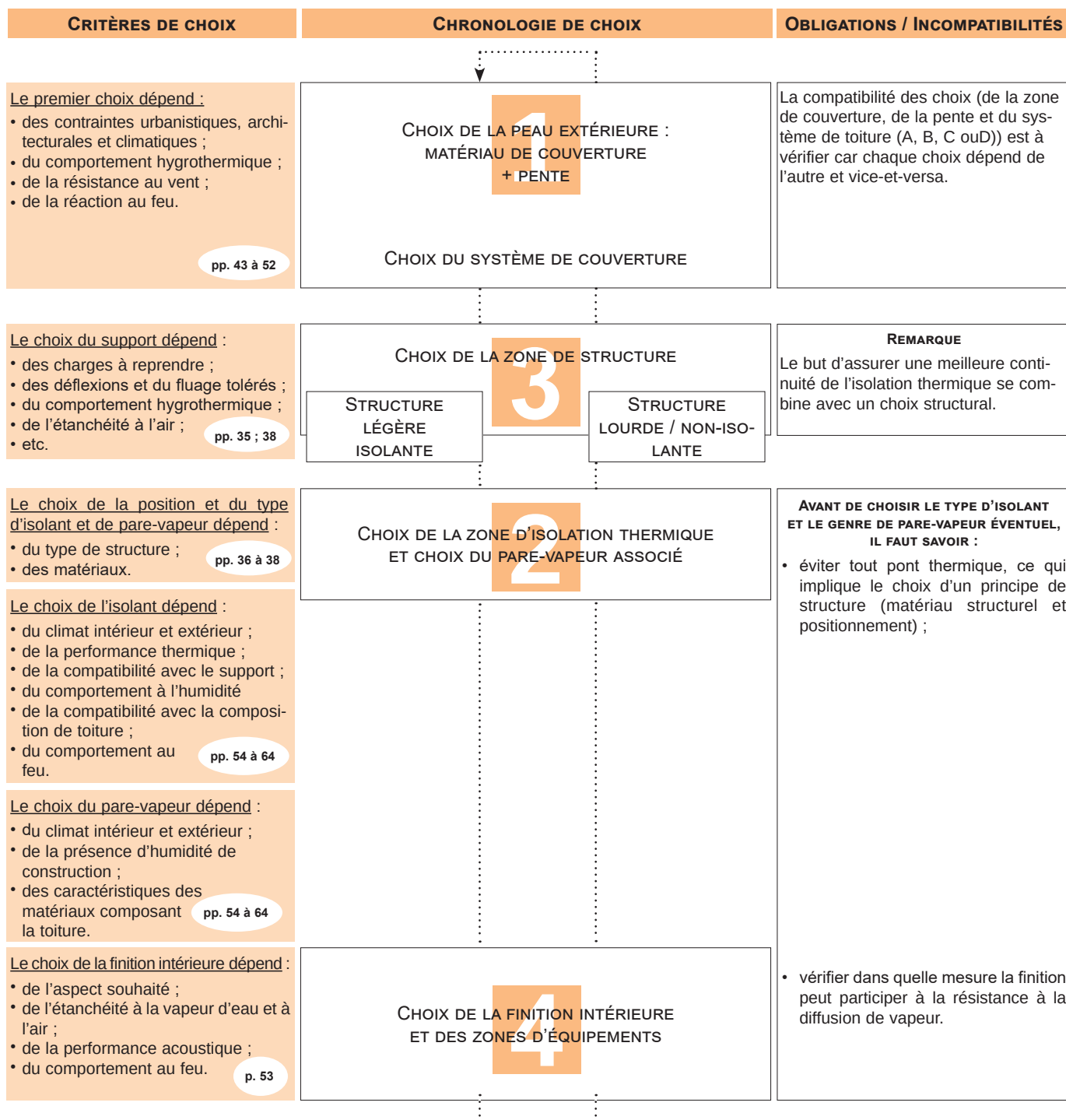
Le lecteur est invité à consulter l'ouvrage "L'isolation thermique de des toitures - Guide pratique pour les architectes" [HAUG-17-2] paru dans la même collection.
Les références de page reprises dans l'organigramme ci-dessous correspondent aux pages du guide précité.



La toiture inclinée est composée de cinq zones :

- 1 = zone du complexe de couverture et d'étanchéité à l'eau extérieure et son support direct ;
- 2 = zone d'isolation thermique (+ pare-vapeur éventuel) ;
- 3 = zone de structure éventuellement séparée ou mixée à la zone d'isolation ;
- 4 = zone libre pour équipement éventuel ;
- 5 = zone de finition.

ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL



LES CHOIX CONCEPTUELS

CHOIX DE LA ZONE 1 : ZONE DE COUVERTURE

Aujourd'hui, il existe sur le marché, une grande palette de "peaux extérieures" (ou "couvertures") qui influencent l'expression architecturale et qui nécessitent une pente appropriée (voir figure ci-contre).

En fonction du matériau de couverture choisi et de la pente, il faut veiller à la compatibilité de ce choix avec l'un et l'autre des quatre systèmes possibles de zone 1 de couverture.

Ces systèmes (A, B, C et D) se différencient selon la continuité de la couverture et la nécessité de ventilation dans le complexe toiture (voir ci-contre).

CHOIX DE LA ZONE 3 : ZONE DE STRUCTURE

La structure porteuse reprend le poids propre des éléments constituant la toiture, les charges climatiques et d'entretien.

Elle reporte ces charges sur les murs et sur les structures principales, auxquels elle doit être correctement ancrée.

De type "lourd" ou "léger", la structure porteuse sera, respectivement, organisée au moyen de :

- matériaux constituant une dalle porteuse en béton (dalle béton coulée sur place ou réalisée à partir d'éléments préfabriqués) ;
- structure légère métallique ou en bois, généralement constituée de pannes avec chevrons ou d'un système avec fermes et chevrons ou uniquement de pannes (cas d'une toiture comportant des éléments autoportants).

A consulter : Les NIT, CSTC Revues, les publications du FERSIC, du Courrier du Bois, les documentations des fabricants.

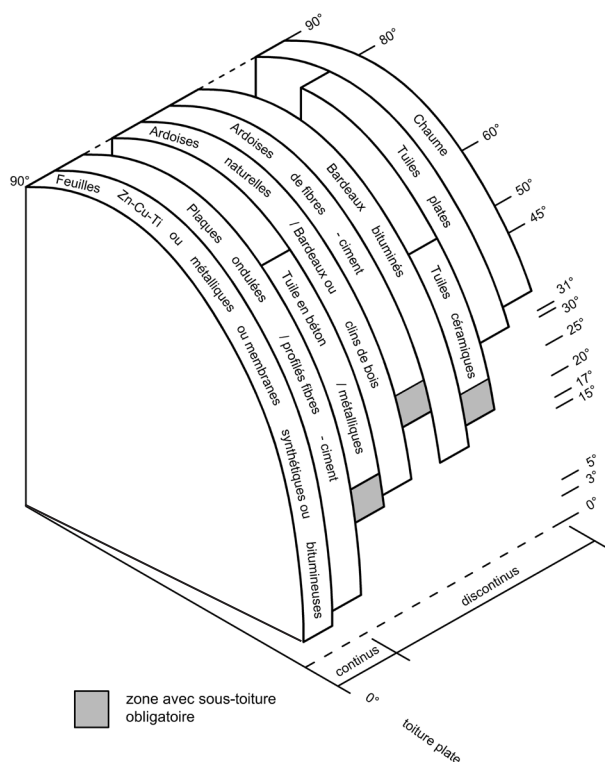
CHOIX DE LA ZONE 2 : ZONE D'ISOLATION

En ce qui concerne le choix de l'isolant et du genre de pare-vapeur éventuellement associé, on consultera les tableaux des pp. 54 à 64 du Guide pratique "*L'isolation thermique des toitures*" [HAUG-17-2].

Dans cet ouvrage, le lecteur trouvera un tableau de synthèse pour l'aider à choisir l'épaisseur d'isolant nécessaire pour obtenir un U inférieur ou égal à $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et le type de pare-vapeur recommandé en général pour le climat (climat II, pour quelques types de toiture) en fonction du matériau isolant et du type de structure (légère ou lourde).

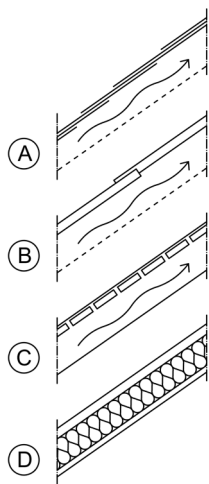
CHOIX DES ZONES 4+5 : ZONES D'ÉQUIPEMENTS ET DE FINITION INTÉRIEURE

Ce choix s'effectue selon des critères cités dans l'organigramme ci-contre. Il faut noter que, si la finition intérieure offre une résistance thermique significative, on pourrait revoir la nécessité de vérifier le pare-vapeur prédimensionné lors du choix de l'isolation.



INTERVALLES DE PENTES POSSIBLES
SELON LE MATÉRIAU DE COUVERTURE

LES QUATRE SYSTÈMES DE TOITURE INCLINÉE



- A = Couche de couverture discontinue ("écaillés") ;
- B = Plaques de (B1) ou tôles (B2) ondulées ou nervurées (voir NIT 225) ;
- C = Idem B, mais couverture en feuilles au lieu de plaques ou de tôles.
- D = Deux types de solutions techniques de toiture "totale" sans aucune ventilation interne de la paroi :
- panneaux composites autoportants, incluant couverture, isolation thermique et finition intérieure ;
 - couverture en tôles (D1), feuilles (D2) ou membranes (D3) non adhérentes à l'isolation thermique + finition intérieure.

Des renseignements complémentaires ainsi qu'une mise à jour des impositions techniques sont disponibles dans :

- la Note d'Information Technique (NIT) 225 du Centre Scientifique et Technique de la Construction [CSTC-02] ;
- le Guide pratique pour architectes "*L'isolation thermique des toitures*" [HAUG-17-2].

LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET

CHOIX DE LA PEAU EXTÉRIEURE

Conditions externes au projet :

- Climat extérieur ;
- Matériaux disponibles (coût) et techniques de pose :
 - pentes possibles ;
 - texture, couleur ;
 - durabilité, entretien ;
- Contraintes urbanistiques d'intégration au site ;
- Contexte réglementaire.

Conditions internes au projet :

- Programme ;
- Climat intérieur ;
- Parti architectural.

=> 1. Matériau visible en couverture, associé à une pente

CHOIX DE LA ZONE DE COUVERTURE ET DU SYSTÈME DE TOITURE

2a. Si la pente de la charpente est forte => écailles

=> système A

ou si l'on veut, technologiquement parlant, supporter les écailles en surtoiture :

=> [système B + écailles] ou [système D + écailles]

2b. Si la pente est faible à moyenne :

=> systèmes B ou C ou D selon questions d'aspect, de coût, de rapidité d'exécution.

=> 2. Choix du système de toiture (A,B, C ou D, avec écailles éventuellement supplémentaires posées en surtoiture dans les cas B ou D), selon :

- le matériau de couverture :

A. écailles

B. plaques ondulées ou nervurées

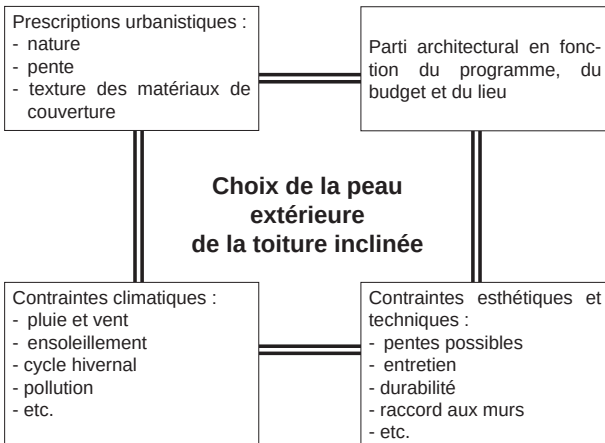
C. feuilles

- la ventilation sous la zone de couverture :

A, B, C : ventilées

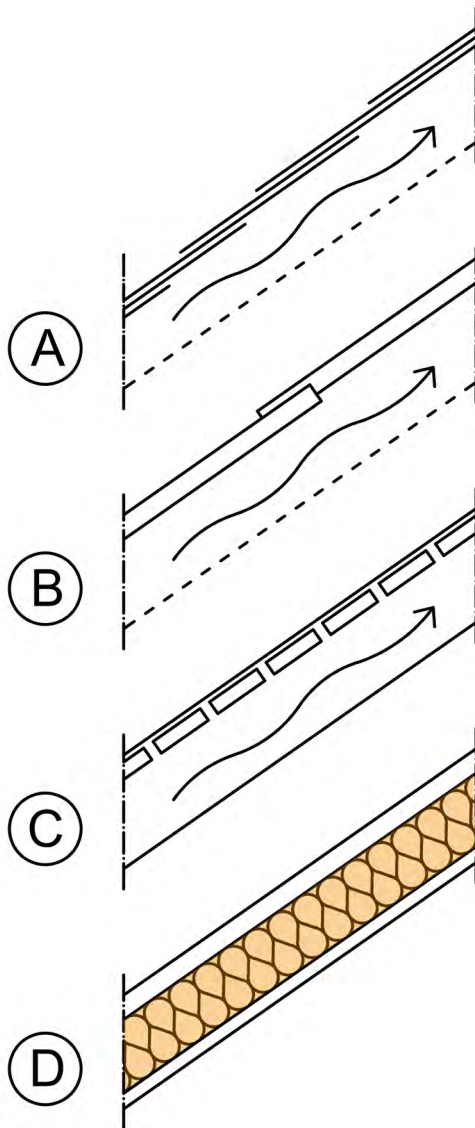
D : non ventilée

Pour approcher les fonctions de la toiture, on différencie 4 systèmes possibles de toiture (systèmes A à D) comme explicités ci-après :



Attention :

Plus la pente augmente, plus l'aspect et la qualité visuelle des matériaux extérieurs ont de l'importance.



Système A :

Couche de couverture discontinue (écaïlles).

La vapeur sachant migrer au travers de la toiture, deux conditions doivent être respectées :

- les couches sont d'autant plus perméables à la vapeur d'eau, que l'on approche de l'extérieur, condition particulièrement recommandée pour la sous-toiture;
- le flux de vapeur d'eau doit être aussi limité que possible, tandis que les condensats occasionnels se produisant au dos du matériau de couverture sont évacués par la sous-toiture.

Système B :

Plaques (B1) ou tôles (B2) ondulées ou nervurées, ventilées en sous-face.

Les mêmes considérations en matière de transfert de vapeur d'eau que celles énoncées dans le système A s'appliquent ici aussi.

Un décor d'écaïlles (ardoises, tuiles...) peut être apposé, en surtoiture, sur la couverture primaire.

Système C :

Idem système B, mais couverture en feuilles au lieu de plaques ou de tôles.

Les mêmes considérations en matière de transfert de vapeur d'eau que celles énoncées dans le système A s'appliquent ici aussi.

Système D :

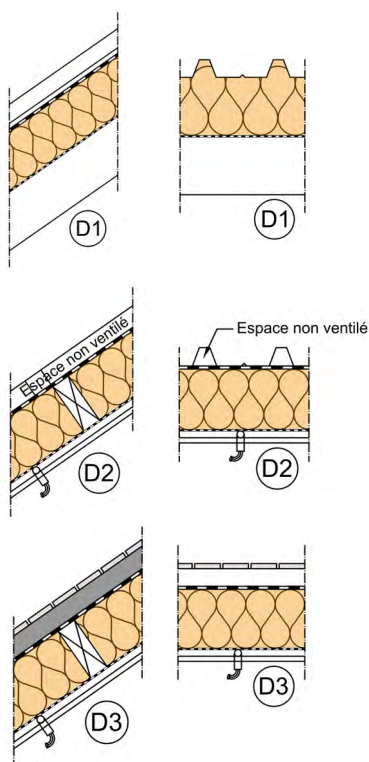
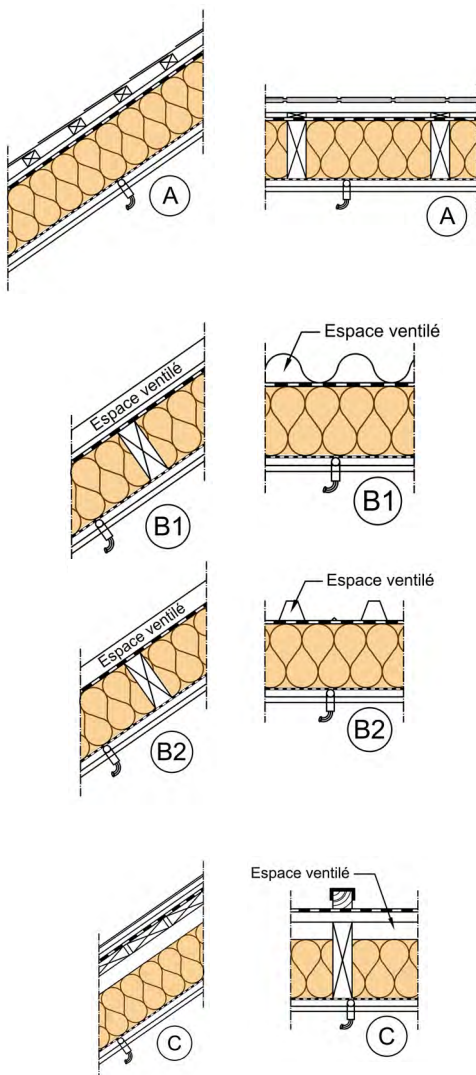
Deux types de solutions techniques de toiture "totale" :

- panneaux composites autoportants, incluant couverture, isolation thermique et finition intérieure;
- couverture en tôles (D1), feuilles (D2) ou membranes (D3) non adhérentes à l'isolation thermique + finition intérieure;

sans aucune ventilation interne de la paroi.

Un décor d'écaïlles peut éventuellement être apposé sur la couverture primaire, en surtoiture.

Les tableaux suivants détaillent les particularités des systèmes A à D, en ce qui concerne les fonctions assumées par la paroi «toiture».



REMARQUE GÉNÉRALE CONCERNANT LA VENTILATION DES TOITURES (SYSTÈMES A, B ET C)

La ventilation de l'espace sous la zone de couverture (donc sous la sous-toiture éventuelle) a longtemps été recommandée, pour éliminer toute humidité excessive ou résiduelle, source de condensats possibles dans cette zone froide. De campagnes de mesures sur des bâtiments existants dans différents pays de climat tempéré humide, il résulte que cette ventilation présente des effets pervers :

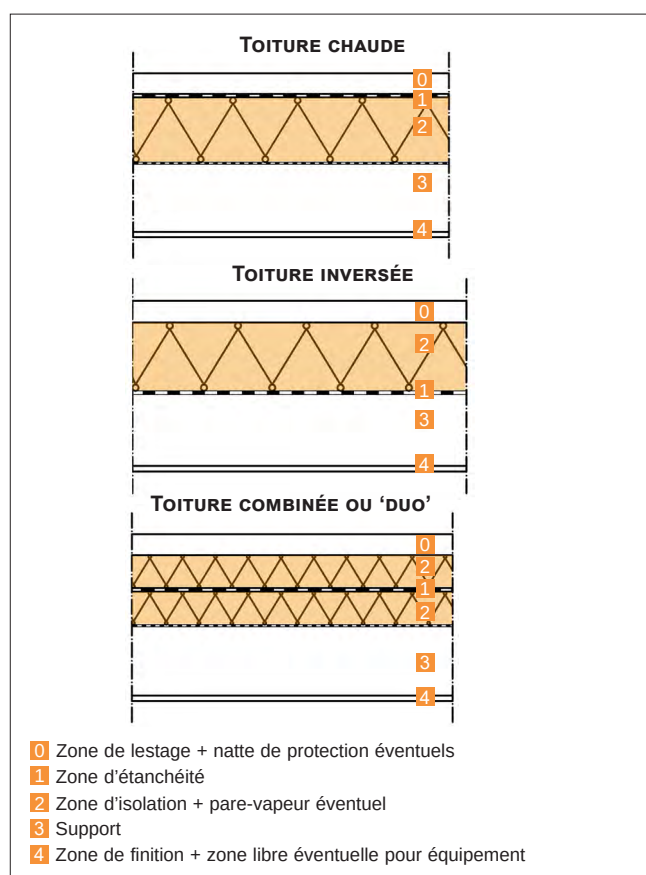
- Elle présente le risque d'un sur-refroidissement pouvant se former sous la sous-toiture, où rien ne permet d'évacuer les condensats.
- La ventilation sous la zone de couverture étant réalisée dans une lame, elle induit des effets de dépression perpendiculaires au mouvement de l'air, s'exerçant sur les «faces» de la lame d'air. Ces dépressions entraînent une aspiration, vers cette lame, de l'air extérieur au travers de la zone de couverture et de l'air intérieur (au travers des 4 zones de toiture sous-jacentes), mouvements dépressionnaires qui s'ajoutent à la dépression naturellement existante au travers de la toiture.
- Cette zone ventilée en contact avec l'air extérieur constitue une voie de pénétration du vent qui peut atteindre l'ambiance intérieure lorsque les zones sous-jacentes de la toiture sont peu étanches à l'air.

La ventilation sous la sous-toiture est à déconseiller, absolument.

LES TOITURES PLATES

Le lecteur est invité à consulter le Guide pratiques pour architectes *L'isolation thermique des toitures* [HAUG-17-2]. Les références de pages reprises dans l'organigramme ci-après correspondent aux pages du guide précité.

Le cas de la toiture froide n'est pas abordé ici car il est fortement déconseillé de mettre en oeuvre ce type de toiture.



Chaque typologie de toiture est divisée en cinq zones (de 0 à 4) reprises dans l'organigramme :

- 0 = zone de lestage + natte de protection éventuels ;
- 1 = zone d'étanchéité ;
- 2 = zone d'isolation + pare-vapeur éventuel ;
- 3 = zone du support ;
- 4 = zone de finition + zone libre éventuelle pour équipements.

LES CHOIX CONCEPTUELS

Le tableau de la page suivante donne une chronologie des choix que l'auteur de projet doit faire lors de la conception d'une toiture plate.

Cette chronologie concerne les toitures de type chaude, inversée et "duo" dont les compositions sont reprises dans l'encadré ci-contre.

Chaque typologie de toiture est divisée en cinq zones (de 0 à 4) reprises dans le tableau :

- zone de lestage + natte de protection éventuels (zone 0) ;
- zone d'étanchéité (zone 1) ;
- zone d'isolation + pare-vapeur éventuel (zone 2) ;
- zone du support (zone 3) ;
- zone de finition + zone libre éventuelle pour équipements (zone 4).

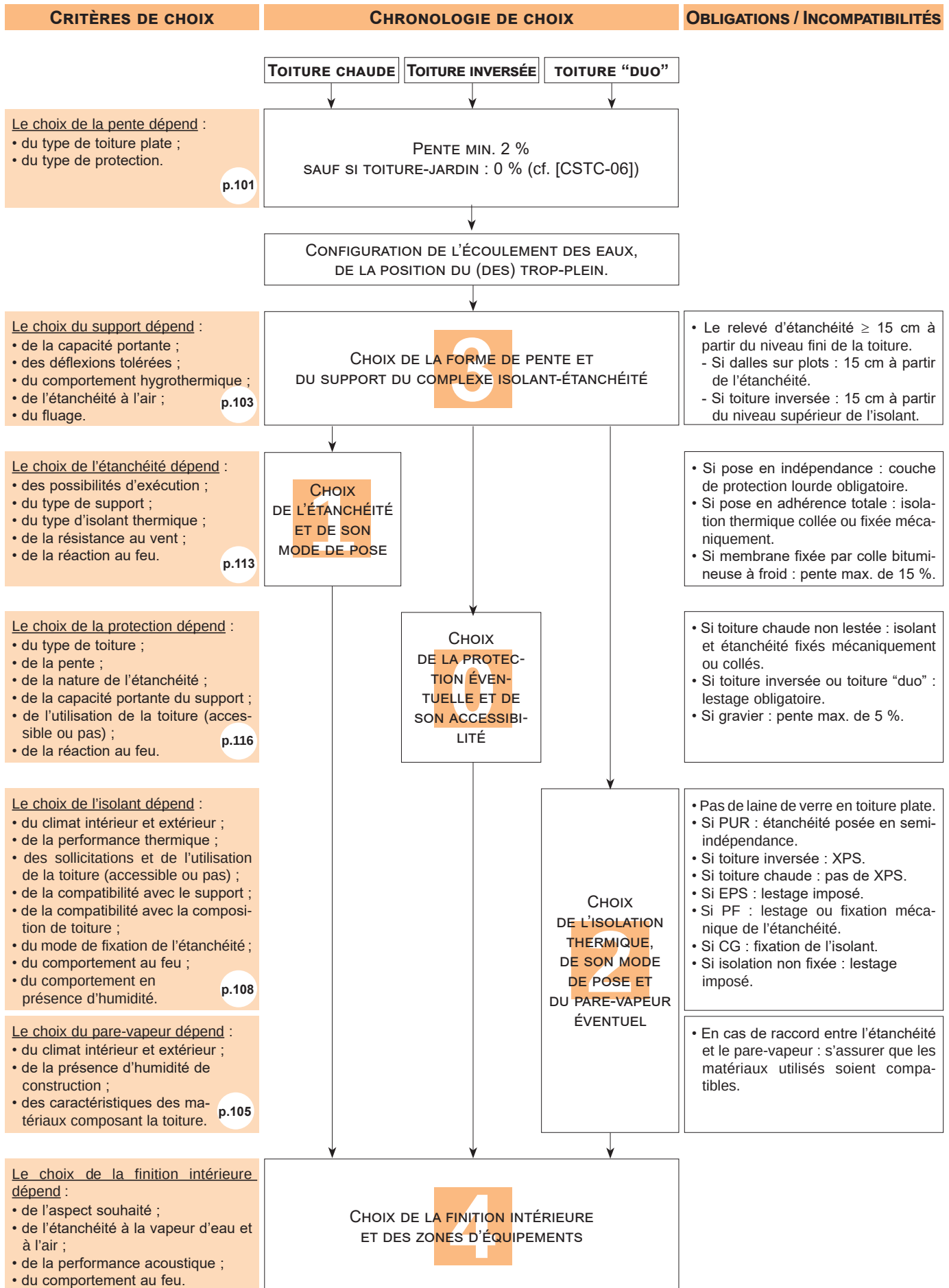
Le cas de la toiture froide n'est pas abordé ici, car ce type de toiture est fortement déconseillé : la mise en oeuvre d'un pare-vapeur efficace est particulièrement difficile, ce qui rend les problèmes de condensation interne presque inévitables. De plus, si le support est en béton, celui-ci travaille thermiquement, ce qui peut également engendrer des dégradations.

Le tableau reprend également les différents critères de choix ainsi que les principales obligations ou incompatibilités concernant le choix de chacune des zones de la toiture plate.

LEXIQUE DES DIFFÉRENTS ISOLANTS THERMIQUES :

- PUR : polyuréthane
- PIR : polyisocyanurate
- EPS : polystyrène expansé
- XPS : polystyrène extrudé
- PF : mousse phénolique
- MW : laine de roche
- CG : verre cellulaire
- EPB : perlite expansée
- ICB : liège

LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION



- [ARCH-97] ARCHITECTURE ET CLIMAT (1997), *Choisir une protection solaire*, Fascicule technique, UCL, SPW (DGO4)
- [ARDO-13] ARDOUREL Y., BRETAGNE E., DECUQ J.-M., KHAINNAR S., LAUDATI P., MESQUITA M., REY M., REZNIKOFF M. (2013), *Éco-construction d'un bâtiment à énergie positive*, Université de Lorraine, <http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr>
- [BALT-02] BALTUS C., NELIS L., GUILLEMEAU J.-M., WAGELMANS P. (2002), *La ventilation naturelle des habitations - Guide pratique pour les menuisiers*, SPW - DGO4, éd. FFC (Fonds de Formation professionnelle de la Construction)
- [BARN-97] BARNAUD G., GANDEMER J., MILLET J.-R., SACRE C. (1997), *Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide - Tome I : méthodologie*, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Paris
- [BERN-97] BERNSTEIN D., CHAMPETIER J.-P., VIDAL T. (1997), *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments : construction et enveloppes lourdes*, Editions du Moniteur, Collection Moniteur Technique, Paris
- [BRUX-13] BRUXELLES ENVIRONNEMENT (2013), *Le Guide Bâtiments Durables*, www.guidebatimentdurable.brussels
- [CIFF-03] CIFFUL (Centre Interdisciplinaire de Formation de Formateurs de l'Université de Liège) (2003), *La construction... Un aspect essentiel du développement durable*, Editions ULg – SPW (DGO4)
- [CSTC-94] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1994), *NIT 192 La ventilation des habitations - 1^{ère} partie : principes généraux*
- [CSTC-98] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1998), *L'isolation thermique des murs pleins*
- [CSTC-00] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2000), *NIT 215 La toiture plate : Composition – Matériaux – Réalisation - Entretien*
- [CSTC-02] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2002), *NIT 225 Toitures en plaques ondulées de fibres - ciment (matériaux - composition - réalisation)*
- [CSTC-06] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2006), *NIT 229 Les toitures vertes*
- [CSTC-14] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2014), *NIT 251, L'isolation thermique des toitures à versants*
- [CSTC-15] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2015), *NIT 255 L'étanchéité à l'air des bâtiments*
- [DEHE-92] DE HERDE A. (1992), *Le manuel du responsable énergie*, Architecture et Climat
- [GUIL-15] GUILLEMEAU J.-M., WAGELMANS P., WAGELMANS J., STIENON Y., GLINEUR M., GILOT R., VAN GOETHEM C. (2015), *Le guide PEB [2015]*, collaboration entre la Direction du bâtiment durable du SPW (DGO4) et le CIFFUL (Centre Interdisciplinaire de Formation de Formateurs de l'Université de Liège)
- [GW -16-1] GW (Gouvernement Wallon) (2016), *Arrêté du Gouvernement Wallon du 28 janvier 2016 modifiant l'AGW du 15 mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments*
- [GW -16-2] GW (Gouvernement Wallon) (2016), *Arrêté du Gouvernement Wallon du 15 décembre 2016 modifiant l'AGW du 15 mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments*
- [HAUG-01] HAUGLUSTAINE J.-M. (2001), *Méthode de conception optimisée de l'enveloppe de bâtiment, aux stades préliminaires du projet architectural - Recherche du meilleur projet, privilégiant les performances d'énergie et de coût*, ULg - Thèse de Doctorat
- [HAUG-09] HAUGLUSTAINE J.-M., DELNOY M., LEVAUX J.-B. (2011), *La PEB expliquée*, Edipro
- [HAUG-17-1] HAUGLUSTAINE J.-M., SIMON F. (2017), *L'isolation thermique des murs - Guide pratique pour les architectes*, SPW - DGO4
- [HAUG-17-2] HAUGLUSTAINE J.-M., SIMON F. (2017), *L'isolation thermique des toitures - Guide pratique pour les architectes*, SPW - DGO4
- [HAUG-17-3] HAUGLUSTAINE J.-M., SIMON F. (2017), *La ventilation et l'énergie - Guide pratique pour les architectes*, SPW - DGO4
- [HAUG-17-4] HAUGLUSTAINE J.-M., SIMON F. (2017), *La fenêtre et la gestion de l'énergie - Guide pratique pour les architectes*, SPW - DGO4
- [HAUG-17-5] HAUGLUSTAINE J.-M., SIMON F. (2017), *La rénovation et l'énergie - Guide pratique pour les architectes*, SPW - DGO4
- [HEGG-11] HEGGER M., STARK T., FUCHS M., ZUMER M. (2011), *Construction en énergie – Architecture et*

développement durable, Presses polytechniques et universitaires romandes

- [IBGE-10] IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement) (2010), *L'Utilisation Rationnelle de l'Energie, une étape essentielle complémentaire au photovoltaïque*, Info fiches - Energie de novembre 2010
- [IBN -00-3] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2000), *NBN EN 12208, Fenêtres et portes - Perméabilité à l'eau - Classification*
- [IBN -03] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2003), *NBN EN 12831 Systèmes de chauffage dans les bâtiments - Méthode de calcul des déperditions calorifiques de base*
- [IBN -08] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2008), *NBN S01-400-1 Critères acoustiques pour les immeubles d'habitation*
- [IBN -12] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2012), *NBN EN ISO 12569 : 2012 Performance énergétique des bâtiments et des matériaux. Détermination du débit d'air spécifique dans les bâtiments. Méthode de dilution de gaz traceurs.*
- [KOHL-98] KOHLER N. (1998), *Sustainability of New Works Practices and Building Concepts*, in STREITZ N. et al., *Cooperative Buildings - Integrating Information, Organization and Architecture*, Éditeur : N. Streitz (Heidelberg), *Computer Science - Proceedings of the First International Workshop on Cooperative Buildings (Co-Build '98)*, Darmstadt (Allemagne), February 1998
- [LIEB-09] LIEBARD A., DE HERDE A. (2009), *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques - Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Editions Observ'ER et du Moniteur
- [LONC-15] LONCOUR X., TILMANS A., MEES C. (2015), *Aspects énergétiques des noeuds constructifs*, CSTC-Contact n° 45 (1-2015)
- [SIMO-95] SIMON F. (1995), *Cours de Composition architectonique et d'Architecture civile*, UCL
- [SPFE-05] SPF Economie (Service Public Fédéral Economie, PME, Classes moyennes & Energie) (2005), *Spécifications techniques unifiées STS 52 Menuiseries extérieures 52.0 Généralités*, SPF Economie
- [VAN -04] VAN DEN ABEELE P. (2004), *Le bois est-il écologique ?*, dans Industrie, Technique et Management, mars 2004

ANNEXE 1

APPROCHE QUANTITATIVE

La première édition du Guide Pratique pour Architectes *La conception de l'enveloppe et l'énergie* comportait, dans cette annexe "Approche quantitative", une méthode graphique qui permettait de déterminer la consommation d'énergie de chauffage d'un bâtiment, ainsi que d'évaluer le risque éventuel de surchauffe. La méthode de calcul était inspirée de celle reprise dans la première réglementation thermique wallonne K 70-Be 500, utilisant le concept des degrés-jours.

Depuis lors, la méthode de calcul PEB a évolué dans le sens de la norme européenne établissant le bilan énergétique d'un bâtiment. Même si les différences entre les résultats obtenus par les deux méthodes sont peu importants, on doit considérer que la méthode graphique est devenue obsolète.

De plus, le logiciel PEB, téléchargeable gratuitement au départ du site <http://energie.wallonie.be> du Département de l'Energie et du bâtiment durable du Service Public Wallonie, permet de réaliser tous les calculs souhaités, même dans les étapes préliminaires d'un projet architectural : on peut, par exemple, en toute première approche, limiter l'encodage de la composition des parois à la seule couche d'isolation thermique, qui apporte la majeure partie de la performance d'isolation thermique des parois, et n'introduire que les données générales des systèmes, pour obtenir aussitôt la consommation d'énergie de chauffage, pour l'eau chaude sanitaire, et l'indice de surchauffe.

ANNEXE 2

DONNÉES

HYGROTHERMIQUES

RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE AUX SURFACES ET RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR	98
RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE	98
RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR	99
COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE U_w DES FENÊTRES	99
LES PARE-VAPEUR	101
LES PARE-PLUIE	101
DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX ISOLANTS	102
DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES AUTRES MATÉRIAUX	104

RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE ET RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR

RÉSISTANCE THERMIQUE D'ÉCHANGE

Pour les surfaces planes et en l'absence de toute information spécifique concernant les conditions de bord, les valeurs de conception des résistances thermiques d'échange R_{si} (conditions intérieures) et R_{se} (conditions extérieures) du tableau ci-dessous peuvent être utilisées.

Ces valeurs sont valables pour des surfaces en contact avec de l'air.

	DIRECTION DU FLUX DE CHALEUR		
	Ascendant	Horizontal ⁽¹⁾	Descendant
R_{si} [m²K/W]	0,10	0,13	0,17
R_{se} [m²K/W]	0,04	0,04	0,04

⁽¹⁾ Valable pour une direction du flux de chaleur qui ne dévie pas de plus de $\pm 30^\circ$ du plan horizontal

RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE R_{si} ET R_{se} (EN m²K/W)

RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR

La résistance thermique d'une couche d'air est dépendante du type de couche d'air, de la direction du flux thermique à travers la couche d'air, de son épaisseur, de la géométrie et de la pente de la couche d'air, de l'émissivité des surfaces délimitantes et des possibilités de ventilation de la couche d'air.

Suivant les cas, la résistance thermique de la couche d'air peut être déterminée soit avec précision par des essais ou des calculs, soit à l'aide de valeurs par défaut qui peuvent être sélectionnées dans des tableaux.

Dans certains cas, la résistance thermique de la couche d'air ou du creux n'est pas calculée séparément mais est déjà comprise dans la valeur U de l'élément de construction dans lequel cette lame d'air ou ce creux sont présents (c'est le cas par exemple des briques perforées, des blocs creux, des vitrages, des encadrements, ...).

NOTE : Les couches d'air ayant une épaisseur supérieure à 300 mm sont traitées comme des espaces adjacents non-chauffés.

Les différentes valeurs à considérer pour la résistance thermique d'une couche d'air sont détaillées dans l'Annexe 3 de l'AGW PEB du 15 décembre 2016 ([GW -16-2] point 5.4 – Résistance thermique des couches d'air).

EXEMPLE DE RÉSISTANCES THERMIQUES EN (m²K/W) DES COUCHES D'AIR NON VENTILÉES ORDINAIRES, DÉLIMITÉES PAR DES SURFACES À ÉMISSIVITÉ ÉLEVÉE

ÉPAISSEUR D DE LA COUCHE D'AIR [MM]	DIRECTION DU FLUX THERMIQUE		
	ASCENDANT	HORIZONTAL ⁽¹⁾	DESCENDANT
0 < d < 5	0,00	0,00	0,00
5 ≤ d < 7	0,11	0,11	0,11
7 ≤ d < 10	0,13	0,13	0,13
10 ≤ d < 15	0,15	0,15	0,15
15 ≤ d < 25	0,16	0,17	0,17
25 ≤ d < 50	0,16	0,18	0,19
50 ≤ d < 100	0,16	0,18	0,21
100 ≤ d < 300	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

⁽¹⁾ pour un flux thermique qui ne dévie pas de plus de ± 30° du plan horizontal

COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE U_w DES FENÊTRES

COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE DES FENÊTRES ET PORTES, DE MATÉRIAUX ET DE DIMENSIONS STANDARD

Le coefficient de transmission thermique d'une fenêtre U_w ou d'une porte U_D ayant des dimensions connues et pourvue de parties vitrées et/ou de panneaux de remplissage opaques et/ou de grilles de ventilation, est généralement calculé au moyen de la formule suivante :

$$U_w \text{ (ou } U_D) = \frac{A_g U_g + A_f U_f + A_p U_p + A_r U_r + l_g \psi_g + l_p \psi_p}{A_g + A_f + A_p + A_r}$$

où,

A [m²] = superficie du vitrage (A_g), du châssis (A_f), de la grille de ventilation (A_r) ou du panneau de remplissage (A_p)

U [W/m²K] = coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g), du châssis (U_f), du panneau de remplissage opaque (U_p) ou de la grille de ventilation (U_r)

ψ [W/mK] = coefficient de transmission linéique tenant compte des effets combinés

- du vitrage, de l'intercalaire et de l'encadrement (ψ_g)
- du panneau de remplissage, de l'intercalaire et de l'encadrement (ψ_p)

l [m] = longueur du raccordement entre l'encadrement et

- le vitrage (l_g)
- le panneau de remplissage (l_p).

La procédure générale pour la détermination de la valeur U des fenêtres et des portes est détaillée dans l'Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2].

Le coefficient de transmission thermique d'une fenêtre (U_w) est déterminé soit par des essais selon la NBN EN ISO 12567-1 (ou NBN EN ISO 12567-2 pour les fenêtres de toit), soit d'après un calcul décrit dans l'Arrêté. Dans l'évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment dans le cadre de la PEB, un calcul fenêtre par fenêtre est en principe réalisé, utilisant la formule reprise dans l'encadré ci-contre.

Une approche simplifiée est également autorisée. Pour des fenêtres sans grille de ventilation ni panneau de remplissage, le coefficient se calcule comme suit :

$$\text{si } U_g \leq U_f, \text{ alors : } U_{w,T} = 0,7 U_g + 0,3 U_f + 3 \psi_{f,g} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$\text{si } U_g > U_f, \text{ alors : } U_{w,T} = 0,8 U_g + 0,2 U_f + 3 \psi_{f,g} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

A titre indicatif, le tableau de la page suivante fournit quelques valeurs de coefficients de transmission thermique $U_{w,T}$ des fenêtres, calculés d'après cette procédure

ANNEXE 2 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

Cette équation peut être utilisée pour les fenêtres constituées de plusieurs types de vitrages, encadrements ou panneaux de remplissage.

Dans son paragraphe « 9. Coefficient de transmission thermique des composants des fenêtres et des portes », l'Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 donne le détail du mode de calcul des coefficients de transmission thermique du vitrage, de l'encadrement, du panneau de remplissage opaque éventuel et de la grille de ventilation éventuelle.

Elle donne également :

- le coefficient de transmission thermique linéique tenant compte des effets combinés du vitrage, de l'intercalaire et de l'encadrement ;
- et le coefficient de transmission thermique linéique tenant compte des effets combinés du panneau de remplissage, de l'intercalaire et de l'encadrement.

simplifiée tenant compte d'une proportion fixe entre l'aire du vitrage et l'aire du châssis, ainsi que d'un périmètre fixe de la vitre ou des intercalaires. Les jonctions entre les profilés et les vitrages sont pourvus d'intercalaires dont le coefficient de transmission thermique Ψ_g [W/mK] est repris dans le tableau ci-dessous, avec pour hypothèse que l'intercalaire choisi est «isolant» lorsque $U_g \leq 1,1$ W/m²K.

La valeur U des fenêtres concerne l'ensemble de la fenêtre, c'est-à-dire la partie vitrage et le châssis et l'intercalaire.

Elle sera plus importante que la valeur U centrale du vitrage, à cause de l'influence du châssis, de l'intercalaire et des raccords au mur.

U _{w,max} = 1,5 W/m²K U _{g,max} = 1,1 W/m²K			VITRAGE DOUBLE				VITRAGE TRIPLE	
			air + 0 couche peu émissive 4/12/4	argon + 1 couche peu émissive 4/12/4	argon + 1 couche peu émissive 4/15/4	krypton + 2 couches peu émissives 6/10/4	argon + 2 couches peu émissives 4/15/4/15/4	argon + 2 couches peu émissives 4/18/4/18/4
CHÂSSIS			U _g = 2,9	U _g = 1,3	U _g = 1,1	U _g = 0,8	U _g = 0,6	U _g = 0,5
Type de châssis		U _f	ψ _g = 0,06	ψ _g = 0,11	ψ _g = 0,07	ψ _g = 0,07	ψ _g = 0,07	ψ _g = 0,07
Métal (alu, acier...)	Coupure 20 mm	2,75	3,05	2,07	1,81	1,60	1,46	1,39
	Coupure 28 mm	2,55	3,01	2,01	1,75	1,54	1,40	1,33
	Coupure 36 mm	2,50	3,00	1,99	1,73	1,52	1,38	1,31
	U _f déterminé par calcul selon norme EN ISO 10077-2, par le fabricant de châssis	1,60	2,82	1,72	1,46	1,25	1,11	1,04
		1,20	2,74	1,61	1,34	1,13	0,99	0,92
		0,90	2,68	1,55	1,27	1,04	0,90	0,83
		0,71 ⁽²⁾	2,64	1,51	1,23	0,99	0,84	0,77
PUR ép. ≥ 8 mm avec renfort métal.		2,80	3,06	2,08	1,82	1,61	1,47	1,40
Bois type 1 : Afzelia, Merbau, Chêne...	ép. 60 mm	2,20	2,94	1,90	1,64	1,43	1,29	1,22
	ép. 80 mm	1,96	2,89	1,83	1,57	1,36	1,22	1,15
	ép. 120 mm	1,58	2,82	1,71	1,45	1,24	1,10	1,03
Bois type 2 : Dark Red Meranti, Sapelli...	ép. 60 mm	2,10	2,92	2,87	1,61	1,40	1,26	1,19
	ép. 80 mm	1,85	2,87	1,80	1,54	1,33	1,19	1,12
	ép. 120 mm	1,48	2,80	1,68	1,42	1,21	1,07	1,00
Bois type 3 : Pin sylvestre, Résineux...	ép. 60 mm	1,93	2,89	1,82	1,56	1,35	1,21	1,14
	ép. 80 mm	1,67	2,83	1,74	1,48	1,27	1,13	1,06
	ép. 120 mm	1,32	2,76	1,64	1,38	1,17	1,03	0,96
Bois + PUR + capot alu ⁽¹⁾		0,66 ⁽³⁾	2,63	1,50	1,22	0,98	0,83	0,76
PVC avec ou sans renforts métalliques	2 chambres	2,20	2,94	1,90	1,64	1,43	1,29	1,22
	3 chambres	2,00	2,90	1,84	1,58	1,37	1,23	1,16
	4 chambres	1,80	2,86	1,78	1,52	1,31	1,17	1,10
	5 chambres	1,60	2,82	1,72	1,46	1,25	1,11	1,04
	+ PUR ⁽⁴⁾	0,74 ⁽⁴⁾	2,65	1,52	1,24	1,00	0,85	0,78

REMARQUES : Selon la réglementation énergétique wallonne en vigueur à partir du 1/01/2017 [GW -16-1], la valeur U_w ne peut être supérieure à 1,5 W/m²K, et la valeur de U_g ne peut dépasser 1,1 W/m²K. Les fenêtres ne respectant pas cette double condition sont grisées dans le tableau.

⁽¹⁾ Selon la fabricant de châssis, qui détermine la valeur de U_i par calcul, conformément à la norme EN ISO 10077-2

⁽²⁾ Pour atteindre cette performance, les chambres en alu sont remplies de mousse isolante

⁽³⁾ Pour atteindre cette performance, les cadres extérieurs du châssis en bois (dormant et ouvrant) sont recouverts d'une mousse isolante, elle-même protégée d'un capot en aluminium

⁽⁴⁾ Pour atteindre cette performance, les chambres de PVC sont remplies de mousse isolante

ANNEXE 2 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

PROFILÉ D'ENCADREMENT	SIMPLE VITRAGE	VITRAGE MULTIPLE			
		$U_g > 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$		$U_g \leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	
		Intercalaire normal	Intercalaire isolant	Intercalaire normal	Intercalaire isolant
$U_f \geq 5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$	0	0,02	0,01	0,05	0,04
$U_f < 5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$	0	0,06	0,05	0,11	0,07

LES PARE-VAPEUR

MATERIAUX PARE-VAPEUR		$\mu \times d$ [m]
Papier peint	ordinaire ép. $\pm 0,15 \text{ mm}$	0,03
	textile ép. $\pm 1 \text{ mm}$	0,045
	vinyl ép. $\pm 1 \text{ mm}$	0,43
Papier bitume	sur une face	0,70
Papier kraft	bitumé ou revêtu d'une feuille d'aluminium	5,00 (E2)
Plaque de plâtre	enrobé avec une feuille aluminium ép. $9 \mu\text{m}$	5,00 (E2)
	enrobé avec une feuille aluminium ép. $15 \mu\text{m}$	15 (E2)
	enrobé avec une feuille aluminium ép. $30 \mu\text{m}$	35 (E3)
Membrane	en PVC	40 (E3)
	en polyisobuthylène	520 (E4)
Peinture	minérale	0,02
	au latex	0,60
	acrylique	0,70
	à l'huile	2,40 (E1)
	vernis d'adhérence	1,35
Film	polymère à base de polyamide hydorrégulant	été : $> 0,2$
		hiver : 15 (E2)
Feuille	de polyéthylène armé micro-perforé	2,5 (E1)
	de polyéthylène ép. $0,2 \text{ mm}$	7,50 (E2)
	de polyéthylène ép. $0,4 \text{ mm}$	15 (E2)
	en aluminium armé	4,3 (E1)
	en aluminium plastifié sur 1 face	20 (E2)
	en aluminium plastifié sur 2 faces	100 (E3)
Bitume	armé voile de verre ép. $\pm 0,3 \text{ mm}$	30 (E3)
	armé aluminium	430 (E4)
	armé polyester APP (résines polypropyléniques)	120 (E3)
	armé polyester SBS (élastomère-caoutchouc)	750 (E4)

LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX PARE-VAPEUR

La nécessité d'un écran pare-vapeur et le type à utiliser dépendent de plusieurs facteurs, dont le climat extérieur et intérieur, les caractéristiques des matériaux composant la façade, leur comportement en présence d'humidité, etc.

On distingue quatre classes de climat intérieur en fonction de la pression de vapeur à l'intérieur des locaux (voir tableau de la p.10).

La performance d'étanchéité à la vapeur d'un écran pare-vapeur est représentée par sa valeur μd (épaisseur équivalente de diffusion) [m] où :

- μ est un coefficient sans dimension qui indique la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau qu'oppose un matériau d'une épaisseur donnée, comparée à celle d'une couche d'air immobile de même épaisseur. Les valeurs μ sont étroitement liées à la nature des matériaux ;
- d est l'épaisseur du matériau exprimée en mètres.

La valeur μd qualifie la résistance qu'offre une couche de matériau à la diffusion de vapeur d'eau.

On distingue quatre classes de pare-vapeur reprises dans le tableau de la p.42, qui donne des informations relatives aux matériaux entrant dans la composition des pare-vapeur, ainsi qu'à leur épaisseur équivalente de diffusion μd .

LES PARE-PLUIE

PARE-PLUIE	ρ [daN/m³]	λ_{int} [W/mK]	$\mu \cdot d$ [m]
Géotextile non tissé	910	0,22	0,02
Plaque en cellulose ou fibres-ciment (ép. 3 mm)	1.350	0,15	0,27
Panneaux de bois multipli - Multiplex (ép. $9,5 \text{ mm}$)	500	0,12	0,50
Feuille de polyéthylène microperforée	920	0,10	2,50
Feuille de bitume à lés ouverts (ép. 4 mm)	1.000	0,20	5,00

ANNEXE 2 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX ISOLANTS

		ρ [daN/m³]	Chaleur massique [J/kgK]	λ_{Uj} [W/mK]	λ_D [W/mK]	
					de	à
D'origine synthétique						
•	les polystyrènes					
	• extrudés (XPS)	25 • 55	1 450	0,045	0,029	0,039
	• expansés (EPS) fabriqués en usine	15 • 30	1 450	0,050	0,030	0,043
	• expansés (EPS) non fabriqués en usine	15 • 30	1 450	0,050	0,031	0,050
•	les polyuréthanes (PUR) ou polyisocyanurate (PIR)					
	• fabriqués en usine en panneaux revêtus	40	1 400	0,035	0,022	0,029
	• non fabriqués en usine	30	1 400	0,055 ⁽¹⁾	0,025	0,040
•	les mousses d'urée-formaldéhyde (UF)					
	• fabriquées en usine	8 • 20	1 400	0,045	-	-
	• non fabriquées en usine	8 • 20	1 400	0,075	0,039	0,039
•	les mousses phénoliques (PF)					
	• fabriquées en usine en panneaux revêtus	8 • 20	1 400	0,045 ⁽²⁾	0,020	0,023
	• non fabriquées en usine	8 • 20	1 400	0,065	-	-
•	les polyesters	25	-	0,050	-	-
•	les polyéthylènes extrudés (PET) en panneaux	??	-	0,050	-	-
D'origine minérale						
•	les laines minérales (MW)					
	• laine de verre fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	25 • 40	1 030	0,050	0,030	0,040
	• laine de verre non fabriquée en usine	25	1 030	0,070	0,030	0,040
	• laine de roche fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	40 • 90	1 030	0,050	0,030	0,040
	• laine de roche non fabriquée en usine	40	1 030	0,070	0,030	0,040
•	le verre cellulaire (CG) en panneaux	(100) 120 • 180	1 000	0,055	0,038	0,050
•	la perlite expansée (EPB) fabriquée en usine, en panneaux	50 • 175	900	0,060	-	-
	la perlite expansée (EPB) non fabriquée en usine en granulats	50 • 175	-	0,080	-	-
•	la vermiculite expansée fabriquée en usine, en panneaux	75 • 130	900	0,090	-	-
	la vermiculite expansée non fabriquée en usine en granulats	75 • 130	1 080	0,110	-	-
•	les granulats d'argile expansé	??	1 000	0,150	-	-
D'origine végétale						
•	les fibres de bois (FB) en panneaux	160 • 270	-	0,060	0,036	0,050
•	la cellulose (CEL) fabriquée en usine, en panneaux	50 • 150	1 100	0,060	-	-
	la cellulose (CEL) en vrac (à projeter ou à insuffler)	35 • 50	1 100	0,080	0,038	0,041
•	le liège (ICB) en panneaux	80 • 120	1 560	0,050	-	-
	le liège (ICB) en vrac / en granules pour bétons allégés	18	-	0,050	0,043	-
•	le chanvre ou «laine» de chanvre	25 • 210	-	0,060	0,038	0,040
•	le lin en panneaux agglomérés	400 • 500	-	0,060	0,038	0,040
	le lin en vrac, rouleaux, panneaux semi-rigides...	18 • 35	-	0,080	0,042	0,060
•	la «laine» de coco fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	20 • 50	-	0,060	-	-
	la «laine» de coco non fabriquée en usine, en vrac	20 • 50	-	0,080	-	-
•	la «laine» de coton fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	20 • 30	-	0,060	0,039	-
	la «laine» de coton non fabriquée en usine, en vrac	20 • 30	-	0,080	-	-
•	les roseaux (panneaux)	env. 100	-	0,060	-	-
D'origine animale						
•	la laine de mouton	10 • 30	-	0,060	0,035	0,060
D'origine végétale ou animale						
•	panneaux ou rouleaux d'isolant à base de fibres végétales ou animales, fabriquées en usine, autre que la cellulose (chanvre, lin, plume, paille, laine de moutons...)	50 • 150	1 100	0,060	0,038	0,040
•	isolant à basse de fibres végétales ou animales non fabriqué en usine, autre que la cellulose (chanvre, lin, plume, paille, laine de moutons...)	-	1 100	0,080	0,043	0,060

ANNEXE 2 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

μ (hum • sec)	Origine	Réaction au feu
150 • 300	-	Combustible
60	-	Combustible
60	-	Combustible
30	-	Combustible
30	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
-	-	Combustible
-	-	Combustible
1,0 • 1,2	-	non combustible
1,0 • 1,2	-	non combustible
1,0 • 1,5	-	non combustible
1,0 • 1,5	-	non combustible
∞	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
-	-	non combustible
3 • 4	défilage de chutes de bois résineux	difficilement combustible
1	journaux, chutes de papier blanc et d'imprimerie	auto-extinguible (agents ignifuges)
1 • 2		
5 • 30		difficilement combustible
20 • 22		
1 • 2	chênevotte du chanvre défibrée en paillettes	difficilement combustible
1 • 2		difficilement inflammable
1 • 2		
1 • 2	le bourre entourant le péricare des noix de coco	ignifugée au sel de bore
1 • 2		
1 • 2	des fibres cadrées et ignifugées au sel de bore	pas de dégagement toxique
1 • 2		
1 • 1,5		
1 • 2	laine tondue + traitement insecticide et ignifuge	pas de dégagement toxique
-	-	-
-	-	-

LÉGENDE

- ρ [daN/m³] = densité
- $\lambda_{U,i}$ [W/(m².K)] = valeurs par défaut de l'Annexe 3 de l'AGW du 15 décembre 2016 [GW -16-2], valeurs utilisées dans ce guide.
- λ_D [W/mK] = valeurs certifiées dans les agréments techniques
- λ_{doc} [W/mK] = valeurs non certifiées par un agrément technique mais reprises dans l'ouvrage [b]
- μ [-] = facteur de diffusion de la vapeur d'eau

Les valeurs λ utilisées dans cet ouvrage, dans le seul but d'illustrer la méthodologie proposée, sont celles qui étaient en vigueur au 1^{er} janvier 2017 (voir Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2]). Les trois Régions (wallonne, de Bruxelles-Capitale et flamande) ont développé une base de données produits (www.epdb.be) reprenant les données certaines pour les produits, à utiliser dans le cadre des calculs PEB.

Remarques :

(1) pour le matériau d'isolation PUR injecté ou projeté in situ, la résistance thermique de la couche d'isolation PUR doit être corrigée selon le point 7.3 de l'Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2], en raison de la difficulté d'en déterminer l'épaisseur exacte.

(2) pour les panneaux d'isolation revêtus en mousse phénolique à cellules fermées, cette valeur est ramenée à 0,030 W/mK.

ANNEXE 2 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES AUTRES MATÉRIAUX

MATERIAUX DE CONSTRUCTION	ρ [daN/m³]	λ_{int} [W/mK]	λ_{ext} [W/mK]	R_{utile} [m² K/W]	μ (humide • sec)	$\mu \cdot d$ [m]
Brique de parement en terre cuite	1.800 • 1.900	0,71	1,40		9 • 14	
Brique pleine de terre cuite cellulaire	± 1.000	0,37	0,47		8	
Brique pleine de terre cuite cellulaire allégée	< 1.000	0,24	0,30		8	
Brique silico-calcaire	1.800 • 1.900	1,14	2,49		15 • 25	
Pierre naturelle (Petit Granit / Calcaire / Marbres)	± 2.700	2,91	3,50		∞	
Bloc de béton cellulaire autoclavés	500 • 600	0,20	0,32		6 • 10	
Bloc de béton d'argile expansée	900 • 1.000	0,38	0,50		5 • 6,5	
Bloc plein de béton lourd	> 1.800	1,30	1,70		13	
Blocs creux de béton d'argile expansée (Ep. 14 cm)	< 1.200			0,30		0,90
Blocs creux de béton d'argile expansée (Ep. 19 cm)	< 1.200			0,35		1,00
Blocs creux de béton d'argile expansée (Ep. 29 cm)	< 1.200			0,45		1,30
Blocs creux de béton lourd (Ep. 14 cm)	> 1.200			0,11		2,00
Blocs creux de béton lourd (Ep. 19 cm)	> 1.200			0,14		2,70
Blocs creux de béton lourd (Ep. 29 cm)	> 1.200			0,20		3,90
Blocs creux de béton lourd (Ep. 39 cm)	> 1.200			0,26		5,10
Mortier de ciment - Crépi de ciment	1.900	0,93	1,50		15 • 41	
Verre	2.500	1,00	1,00		∞	
Brique de verre (Ep. 8 / 10 cm)	2.500			0,15		∞
Bois feuillus durs et résineux	< 600	0,13	0,15		23 • 185	
Bois feuillus durs et résineux	> 600	0,18	0,20		37 • 370	
Panneau de fibres de bois liées au ciment	1.200	0,23			3,7 • 10	
Ardoise naturelle	< 2.700	2,10	2,10		> 600	
Ardoise ou plaque ondulée de fibres-ciment	1.400 • 1.900	0,35	0,50		37 • 150	
Ardoise de zinc-cuivre-titane (ép. 0,65 mm)	7.000		110			2
Tuile de béton	2.200			0,01		0,65
Tuile de terre cuite	1.600			0,01		0,27
Tuile métallique (ép. 0,65 mm)	7.000		110			2
Plaque en fibres de silicate	1.200	0,175			3.200	
Zinc	7.200	110	110		∞	
Feuilles de zinc-cuivre-titane (ép. 0,7 mm) à joints debout	7.000		110			40
Tôle de couverture en acier (ép. 0,63 mm)	7.800		50			50
Bitume polymère armé non tissé polyester	1.000	0,20	0,20		∞	
Bardeaux bitumés cloués	1.000		0,20		830	
Bardeaux bitumés soudés	1.000		0,20		4.150	
Membrane en PVC (ép. 1,5 mm)	1.400		0,20			30
Feutre bitumé	1.100	0,23	0,23		100 • 1.000	
Panneaux de bois multipli - Multiplex	500	0,14	0,15		40 • 100	
Plaque cellulose - fibres-ciment	1.450			0,02		0,22
Plancher brut préf. béton lourd (avec éléments creux) ép. 12 cm	1.500			0,11		2,70
Plancher brut préf. béton lourd (avec éléments creux) ép. 20 cm	1.500			0,15		3,30
Plancher brut préf. béton argile expansée (Ep. 12 à 15 cm)	1.100			0,20		0,60
Plancher brut préf. terre cuite en éléments creux (2) ép. 12 cm	1.100			0,13		2,20
Béton armé	2.400	1,70	2,20		13	
Béton lourd normal non armé	2.200	1,30	1,70		13	
Béton léger en chape	800 • 850	0,24	0,40		10	
Enduit de plâtre	1.300	0,52			6 • 10	
Plaque de plâtre enrobé (Ep. 9,5 / 12,5 mm)	1.300			0,05		0,05 • 0,11
Plâtre avec granulats légers	800 • 1.100	0,35			6 • 10	
Linoléum	1.200	0,19			1.800	
Tapis (textile)	200	0,06				2,50
Carreau de PVC	1.200	0,19			1.470	
Carreau de terre cuite	1.700	0,81	1,00		9 • 14	
Carreau de grès	1.000	1,20	1,30		150 • 300	

ANNEXE 3

GLOSSAIRE

BNE

On distingue les besoins nets en énergie pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire

BNE chauffage :

Les besoins nets d'énergie pour le chauffage correspondent à ce qu'il faut apporter comme énergie pour compenser les déperditions (par transmission, in/exfiltration et ventilation) pour maintenir une température intérieure définie (température de consigne) au sein du volume protégé, après avoir déduit les apports solaires et internes. Ces besoins seront compensés par un système de chauffage ou de refroidissement.

Les besoins nets en énergie sont donc uniquement liés aux caractéristiques constructives et à la fonction du bâtiment. Ils ne dépendent pas des caractéristiques des installations techniques.

BNE eau chaude sanitaire :

Les besoins nets en énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS) sont évalués sur une base forfaitaire en fonction du volume protégé de chaque unité PEB résidentielle.

CAPACITÉ THERMIQUE

Elle est définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température d'un mètre cube de matériau. Elle est le produit de la chaleur spécifique C [J/kgK] du matériau et de sa densité (ρ en [kg/m³]).

CAPILLARITÉ

Ensemble des phénomènes relatifs au comportement des liquides dans des tubes très fins ; "aspirations" dans le cas de l'eau. Un matériau est dit capillaire lorsqu'il absorbe l'eau, telle une éponge.

"CHAUD AUX PIEDS"

Sur certains planchers, une sensation désagréable de froid peut se faire ressentir qui dépend, d'une part, de la température superficielle θ_s ou température du plancher et, d'autre part, de la nature du plancher et de

son revêtement.

La sensation de confort varie selon le type de chaussures. En général, on conseille d'obtenir les températures superficielles du plancher dans les fourchettes suivantes :

- pièces de passage : $17^{\circ}\text{C} < \theta_s < 28^{\circ}\text{C}$;
- pièces de séjour : $20^{\circ}\text{C} < \theta_s < 26^{\circ}\text{C}$.

COEFFICIENT DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUE λ

La conductivité thermique λ [W/mK] d'un matériau représente la quantité de chaleur traversant, par unité de temps, un mètre carré d'un matériau homogène ayant une épaisseur d'un mètre et soumis à une différence de un degré kelvin entre ses deux faces.

COEFFICIENT DE RÉSISTANCE À LA DIFFUSION DE VAPEUR D'EAU μ ET ÉPAISSEUR ÉQUIVALENTE DE DIFFUSION μd

μ est un coefficient sans dimension qui indique la résistance à la diffusion de vapeur d'eau qu'oppose un matériau d'une épaisseur donnée, comparée à celle d'une couche d'air immobile de même épaisseur. Les valeurs μ sont étroitement liées à la nature des matériaux.

Lorsque d représente l'épaisseur du matériau en mètre, la **valeur μd** indique la résistance qu'offre une couche de matériau à la diffusion de vapeur d'eau.

COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE D'UNE PAROI U (ANCIENNEMENT DÉNOMMÉ k)

Ce coefficient, exprimé en W/m²K, indique la quantité d'énergie qui passe par unité de temps au travers d'une surface d'un mètre carré lorsque la différence de température entre les faces intérieure et extérieure de la paroi est de 1 K.

Plus basse est la valeur de U , plus la paroi considérée est performante du point de vue de l'isolation thermique.

COMPACITÉ VOLUMIQUE

La compacité volumique d'un bâtiment s'exprime comme le rapport du volume protégé V sur la surface totale de déperdition A_T .

CONDENSATION DE LA VAPEUR D'EAU

Transformation de la vapeur d'eau en eau liquide, notamment lors :

- du refroidissement d'un air chargé en vapeur d'eau ;
- d'une production de vapeur d'eau dans un air saturé en humidité.

La condensation se produit si, à un endroit, la pression partielle de vapeur devient égale à la pression de vapeur de saturation correspondant à la température régnant à cet endroit.

Dans le bâtiment, on distingue deux grands types de condensation et un troisième se situant entre les deux premiers :

- la condensation de surface ;
- la condensation interne par diffusion de vapeur ;
- la condensation interne par transport de vapeur par convection.

La condensation de surface

Lorsque l'air est en contact avec une surface froide dont la température est égale ou inférieure à la température de rosée, il apparaît de la condensation dite de surface. Cette condensation de surface lorsqu'elle est localisée en un endroit précis dénonce la présence d'un pont thermique.

Dans les bâtiments, la condensation de surface apparaît d'abord sur les vitres, les châssis métalliques sans coupure thermique, les conduites d'eau froide, et sur les parties froides de l'enveloppe.

Pour empêcher la condensation de surface il faut :

- avoir une qualité suffisante de l'isolation de l'enveloppe de façon à ce que la température de la face intérieure de celle-ci ne descende pas en dessous de 17.5 °C ;
- diminuer par ventilation complémentaire l'humidité relative de l'air intérieur ;
- chauffer la face intérieure des parois froides.

La condensation interne par diffusion de vapeur

Il se produira de la condensation interne dans une paroi s'il y a une différence de température et de pression de vapeur dans cette paroi et que, localement, la pression de vapeur est égale à la tension de saturation.

La condensation interne par diffusion de vapeur a pour effet de créer dans la construction des zones mouillées en permanence et donc une perte d'isolation thermique et, éventuellement, une dégradation des parois.

Contrairement à la condensation de surface, la condensation interne n'est pas visible directement.

Il n'y a pas de condensation interne dans une paroi constituée d'un seul matériau.

Si on veut éviter la condensation interne dans une paroi constituée de plusieurs couches de matériaux différents,

il faut que la perméabilité à la vapeur de ceux-ci augmente de l'intérieur vers l'extérieur.

Si ce n'est pas possible, il faut poser un pare-vapeur du côté chaud de la paroi pour provoquer une chute de la pression de vapeur avant l'isolant.

La condensation interne par transport de vapeur par convection

Convection signifie déplacement d'air intérieur ou extérieur à travers un élément de construction. Elle se produit lorsqu'il existe des différences de pression de vent et de température de part et d'autre de l'élément et que la finition intérieure est perméable à l'air.

Dans ce cas, l'air intérieur humide peut, au sein de l'élément, entrer en contact avec une surface à une température plus basse que son point de rosée, ce qui entraîne la formation de condensation sur cette surface.

Les problèmes liés au transport de vapeur par convection sont bien plus fréquents que ceux liés à la simple diffusion de vapeur. Les quantités de condensation interne sont également plus élevées. Toutefois, il n'existe pas une méthode de calcul pratique pour évaluer ce problème.

CONDUCTION THERMIQUE

Mode de propagation de la chaleur à travers un corps ou entre deux corps en contact direct.

La quantité de chaleur qui va se propager par conduction en un temps donné, est :

- directement proportionnelle à la conductivité thermique des matériaux constituant la paroi et à la différence de température entre les deux faces ;
- inversement proportionnelle à l'épaisseur des lames constituant la paroi.

CONVECTION

Transfert de chaleur de la surface d'un corps solide à un milieu gazeux et inversement.

L'intensité de l'échange dépend de la différence de température entre la paroi et l'air, de la vitesse de l'air et des caractéristiques géométriques des parois.

DIFFUSION DE LA VAPEUR D'EAU

Déplacement de la vapeur d'eau d'une zone vers une autre, entre lesquelles existe une différence de pression partielle de vapeur d'eau. La vapeur se déplace de la zone "haute pression" vers la zone "basse pression".

Dans le cas des habitations, l'air intérieur en général plus chaud et humide est à une haute pression tandis que l'air extérieur plus froid et plus sec est à une basse pression.

DIFFUSIVITÉ THERMIQUE

Elle correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau [m^2/h] et peut se définir par la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température.

Elle est directement proportionnelle à sa conductivité thermique λ et inversement proportionnelle à sa chaleur volumique (masse volumique ρ x chaleur massique c) :

$$\text{diffusivité thermique} = \lambda / (\rho \times c)$$

DRAINAGE

Technique destinée à favoriser la récolte, l'écoulement et l'évacuation d'un liquide, de l'eau en particulier.

EFFET DE SERRE

Le phénomène appelé "effet de serre" est basé sur la captation de l'énergie solaire à travers les parois translucides.

Si le rayonnement solaire atteint une paroi translucide, cette paroi ;

- transmet les rayonnements à courtes longueurs d'onde vers l'intérieur ;
- réfléchit une partie de l'énergie (grandes longueurs d'onde) ;
- absorbe puis réémet de l'énergie.

Le rayonnement solaire dont la longueur est courte, traverse le vitrage. Il atteint l'intérieur du local et en réchauffe les objets et les parois.

Etant donné que le rayonnement réémis a une grande longueur d'onde et que les objets et matériaux translucides des parois extérieures sont "pratiquement opaques" à ces longueurs d'onde, il s'ensuit une augmentation de la température du local.

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE (OU EFFICIENCE ÉNERGÉTIQUE D'UNE HABITATION)

Qualité d'un équipement qui permet d'obtenir un résultat précis tout en consommant un minimum d'énergie.

EFFUSIVITÉ THERMIQUE E_f

Elle mesure la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur provenant d'un autre matériau plus chaud que lui et mis en contact avec lui.

L'effusivité thermique E_f [kJ/m²sK] indique combien de kilojoules ont pénétré sur 1 m² de surface du matériau, une seconde après qu'elle ait été mise en contact avec une autre surface de 1 m² plus chaude qu'elle, de 1 degré Kelvin.

E_f est la racine carrée du produit de la masse volumique ρ , de la capacité thermique C et de la conductivité thermique λ :

$$E_f = \sqrt{(\rho \times C \times \lambda)}$$

- un E_f élevé signifie que le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie, sans se réchauffer notablement ;
- un E_f plus bas signifie que le matériau se réchauffe plus vite.

La chaleur subjective ressentie par le corps en contact avec la paroi est inversement proportionnelle à l'effusivité du matériau de revêtement de celle-ci.

ENVELOPPE DU BÂTIMENT

L'enveloppe d'un bâtiment est l'ensemble des parois ou parties de parois (verticales, horizontales ou inclinées) séparant le volume protégé du bâtiment :

- de l'ambiance extérieure ;
- du sol ;
- des espaces voisins qui n'appartiennent pas à un volume protégé.

ÉTANCHÉITÉ À L'EAU ET À L'AIR

Moyen permettant d'éviter le passage de l'eau ou de l'air. Les techniques qui assurent l'étanchéité à l'eau et à l'air d'un bâtiment sont très différentes l'une de l'autre, notamment :

- membranes d'étanchéité, enduits hydrofuges pour l'étanchéité à l'eau ;
- enduit (plâtre ou ciment), feuille de PVC, préformé à cellules fermées pour l'étanchéité à l'air.

HUMIDITÉ DANS UNE HABITATION

Présence ou transport de l'eau sous la forme liquide ou sous la forme de vapeur d'eau (mélangée à l'air). En hiver, l'humidité peut également se présenter sous forme de glace.

Le transport de l'humidité peut notamment se réaliser par :

- aspiration de l'eau par les matériaux poreux (capillarité), humidité ascensionnelle ;
- vaporisation (ou évaporation) et condensation de la vapeur d'eau ;
- absorption par les matériaux poreux de la vapeur d'eau contenue dans l'air (hygroscopicité) ;
- infiltration d'eau par des interstices ;
- diffusion de la vapeur d'eau au travers des matériaux poreux.

ISOLANT THERMIQUE

Matériau très peu conducteur de la chaleur. On considère qu'un matériau est isolant thermiquement lorsque sa conductivité thermique λ est inférieure à 0,065 W/mK.

INERTIE THERMIQUE

L'inertie thermique d'une paroi ou d'un habitat dans son ensemble a pour effet un déphasage entre l'accumulation de chaleur et sa redistribution en surface des parois et sur la température de l'air intérieur.

Cette propriété est, avec l'isolation thermique, un facteur de confort et d'économie d'énergie. En effet, un fort volant d'inertie conduit :

- en hiver, à un fonctionnement régulier de l'installation de chauffage. Ce qui permet une puissance installée moindre et des variations de la température intérieure plus lentes et plus réduites, donc plus acceptables ;
- en saison d'été, à une température intérieure clémente en soirée et fraîche pendant la journée.

NIVEAU K

Niveau d'isolation thermique globale d'un bâtiment. Il est calculé selon les normes NBN B62-301 et NBN B62-002.

OUVERTURE D'ALIMENTATION (OAM - OAR) ET D'ÉVACUATION (OEM - OER)

Une ouverture destinée à l'entrée d'air dans un local est une ouverture d'alimentation. Celle-ci peut être mécanique (OAM) ou naturelle (OAR).

Une ouverture destinée à la sortie de l'air vicié d'un local est une ouverture d'évacuation. Celle-ci peut être mécanique (OEM) ou naturelle (OER).

OUVERTURE DE TRANSFERT OT

Ouverture ou fente permanente non obturable permettant le passage libre de l'air de l'espace intérieur à un autre. Elle se place uniquement dans les parois ou les portes intérieures ou autour des portes intérieures.

PARE-VAPEUR

Un pare-vapeur est un écran qui freine - voire arrête - le passage de la vapeur d'eau.

PONT THERMIQUE

Un pont thermique est engendré par une interruption ou une diminution locale de la couche d'isolation thermique de l'enveloppe d'un bâtiment, ce qui provoque un passage préférentiel de la chaleur entre deux ambiances de température différente.

RÉSISTANCE THERMIQUE D'UN MATÉRIAU

C'est la capacité qu'a un matériau de freiner le flux de chaleur à travers lui. Cette résistance s'exprime en m^2K/W .

RAYONNEMENT

Emission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques traversant le vide et les gaz. Cette émission peut être visible (lumière) ou invisible (infrarouge, ultraviolet, onde radio, rayon X).

Tous les corps émettent un rayonnement : pour les températures inférieures à $300^\circ C$, celui-ci est uniquement composé d'infrarouges.

SURFACE TOTALE DE DÉPERDITION A_T

L'ensemble des parois par lesquelles le volume protégé de la maison peut perdre de la chaleur constitue la surface de déperdition A_T [m^2].

Les murs intérieurs séparant deux volumes protégés distincts ne font pas partie de cette surface.

La superficie de la surface de déperdition est égale à la somme des surfaces de pertes vitrées et opaques.

TEMPÉRATURE DU POINT DE ROSÉE

Température critique à laquelle l'humidité relative arrive à saturation lorsque le volume d'air considéré se refroidit.

TRANSPORT DE LA VAPEUR D'EAU

La vapeur d'eau se propage de deux manières :

- la vapeur d'eau contenue dans l'air se déplace en même temps que celui-ci ; on parle de convection si le déplacement est naturel et de ventilation si il est provoqué ;
- la vapeur migre au travers de matériaux poreux, on parle alors de diffusion.

VENTILATION DE BASE OU HYGIÉNIQUE

Ventilation minimale nécessaire pour garantir une qualité de l'air suffisante, pour réduire la concentration des odeurs, de l'humidité et d'éventuelles substances nocives, ainsi que pour les évacuer. Elle requiert des débits d'air limités qui doivent pouvoir être réalisés de manière permanente.

VENTILATION INTENSIVE (PÉRIODIQUE)

Ventilation nécessaire uniquement dans des circonstances plus ou moins exceptionnelles, comme :

- par temps très chaud ou ensoleillement intensif provoquant une surchauffe ;
- lors d'activités générant une production élevée de substances nocives ou d'humidité ;
- lors d'une occupation extraordinaire, par exemple une réception.

Il s'avère alors nécessaire d'aérer intensivement les locaux concernés par l'ouverture de certaines fenêtres ou portes, pendant des périodes déterminées.

VOLUME CHAUFFÉ

Volume [m^3] comprenant tous les espaces chauffés directement et qui sont thermiquement isolés de l'ambiance extérieure, du sol ou d'espace voisin non à l'abri du gel.

VOLUME D'AIR D'UN LOCAL

Volume [m^3] que l'on obtient en multipliant la superficie au sol par la hauteur du local (entre les niveaux finis du plancher et du plafond).

Si la hauteur du local n'est pas constante, on prend en compte la hauteur moyenne du local.

VOLUME PROTÉGÉ

Ce volume [m^3] comprend tous les espaces chauffés directement ou indirectement et qui sont thermiquement isolés de l'ambiance extérieure, du sol ou d'espace voisin non à l'abri du gel.

Le volume protégé est calculé à partir des dimensions extérieures des ouvrages.

SOMMAIRE	2
PREFACE	4
ENJEUX.....	5
LES DEUX PRINCIPAUX ENJEUX	5
L'HOMME ET LE CONFORT.....	5
<i>Le bilan thermique de l'homme dans son environnement.....</i>	5
<i>La température de confort.....</i>	6
L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉNERGIE.....	6
<i>Le concept de développement durable.....</i>	6
CONCILIER CES ENJEUX DANS LA CONCEPTION DU BÂTIMENT.....	7
L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE (URE) ET L'UTILISATION DURABLE DE L'ÉNERGIE (UDE).....	7
<i>La typologie du bâtiment.....</i>	8
<i>Le bilan énergétique.....</i>	9
<i>L'isolation thermique.....</i>	9
<i>L'adéquation entre le mode d'occupation et le bâtiment.....</i>	10
LE CADRE DE CET OUVRAGE	11
L'IMPORTANCE DE LA PART DE L'UTILISATION DU BÂTIMENT DANS SON BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBAL.....	12
L'ÉMISSION OU LE STOCKAGE DE CO ₂ LORS DE LA CONSTRUCTION.....	12
LA CONSOMMATION GLOBALE D'ÉNERGIE.....	13
LE CYCLE DE VIE.....	14
LES FONCTIONS ET LES PERFORMANCES DE L'ENVELOPPE	16
LES PRINCIPALES SOLLICITATIONS DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE	17
LES FONCTIONS À REMPLIR PAR L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE.....	17
LE CONTRÔLE DU CLIMAT LOCAL PAR L'ARCHITECTURE	18
<i>L'eau sous toutes ses formes.....</i>	18
<i>L'air.....</i>	20
<i>La chaleur.....</i>	20
<i>Le rayonnement solaire.....</i>	22
LE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT	22
<i>Le bruit.....</i>	22
<i>La lumière et les vues.....</i>	23
LES AUTRES FONCTIONS.....	24
<i>Le contrôle des accès.....</i>	24
<i>Le contrôle des effractions.....</i>	24
<i>La résistance et la réaction au feu.....</i>	24
<i>La fonction structurale.....</i>	24
<i>La fonction visuelle et «d'aspect».....</i>	24
L'ENVELOPPE ET L'HYGROTHERMIE.....	25
LES RÔLES DE L'ENVELOPPE EN CE QUI CONCERNE L'HYGROTHERMIE.....	26
LES CINQ PRINCIPES LIÉS À L'HYGROTHERMIE	26
L'ÉTANCHÉITÉ À L'EAU ET À L'AIR.....	26
L'ÉTANCHÉITÉ À L'EAU	26
<i>La barrière extérieure perméable à l'eau.....</i>	26
<i>La barrière extérieure étanche à l'eau.....</i>	27
<i>La coulisse de séparation drainante.....</i>	27
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	27

La "mesure" de l'étanchéité à l'air.....	28
L'étanchéité à l'air des portes et des fenêtres.....	29
L'étanchéité à l'air dans la PEB.....	29
LE CONTRÔLE DE LA VENTILATION	30
LES BESOINS DE VENTILATION	31
Les exigences réglementaires pour les bâtiments résidentiels.....	31
Les exigences réglementaires pour les immeubles non résidentiels.....	32
LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE VENTILATION.....	33
L'ISOLATION THERMIQUE CONTINUE	34
LES DÉPERDITIONS DE L'ENVELOPPE, PAR TRANSMISSION.....	34
Le calcul de la résistance thermique R d'une paroi.....	34
Le calcul du coefficient de transmission thermique U d'une paroi.....	36
Le calcul des pertes par transmission P_e de l'enveloppe.....	36
L'influence des ponts thermiques.....	36
Les nœuds constructifs.....	38
LE CONTRÔLE DE LA MIGRATION DE VAPEUR AU TRAVERS DE LA PAROI	40
LE PRINCIPE DE LA DIFFUSION DE VAPEUR : RÉSISTANCE DÉGRESSIVE.....	40
LA PARTICIPATION DE L'ENVELOPPE EXTÉRIEURE À L'INERTIE THERMIQUE	42
L'INERTIE THERMIQUE : PRINCIPE ET DÉFINITION.....	42
Le principe.....	42
De quoi dépend l'inertie thermique ?.....	42
L'inertie de transmission et l'inertie d'absorption.....	43
L'approche simplifiée, dans le cadre de la PEB.....	44
LES EFFETS DE L'INERTIE.....	44
Exemple 1 : Hiver - Journée froide - Chauffage (occupation permanente).....	45
Exemple 2 : Printemps - Journée moins froide et ensoleillée - Chauffage (occupation permanente).....	45
Exemple 3 : Été - Journée ensoleillée - Fenêtres ouvertes.....	46
Exemple 4 : Été - Journée ensoleillée - Fenêtres fermées.....	47
LA POSITION DE L'ISOLATION THERMIQUE DANS LA PAROI.....	48
LES PRINCIPES ET OUTILS DE CONCEPTION	50
LA FORME GLOBALE DE L'ENVELOPPE.....	50
LE CONTEXTE.....	50
Le macroclimat.....	50
Le microclimat.....	51
LE PROGRAMME ARCHITECTURAL.....	54
Le zonage des activités et la thermique passive.....	54
LA COMPACTITÉ ET LA DENSITÉ DU BÂTI	55
La cohérence entre les technologies d'enveloppe.....	55
La continuité de l'isolation thermique dans la paroi, combinée ou non à un pare-vapeur.....	56
LES RELATIONS STRUCTURE / ENVELOPPE	60
LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE.....	61
LA VALEUR U DES PAROIS.....	63
LA VALEUR DU NIVEAU D'ISOLATION THERMIQUE GLOBALE K DE L'UNITÉ PEB	63
LE NIVEAU E_w DE L'UNITÉ PEB	64
Le niveau E_w d'une unité PER (logement individuel).....	64
Le niveau E_w d'une unité PEN (unités non résidentielles et logements collectifs).....	64
LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE SPÉCIFIQUE E_{SPEC}	67
L'OBLIGATION DE VENTILER L'UNITÉ PEB	67
L'INDICE DE SURCHAUFFE.....	68
LES SYSTÈMES	70
LES ÉTAPES DE CONCEPTION	71

ORGANIGRAMME.....	72
LES ELEMENTS DE COMPOSITION.....	73
CONCEPTION GÉNÉRALE DES ESPACES CHAUFFÉS ET NON CHAUFFÉS	74
ZONAGE THERMIQUE.....	74
<i>Parois extérieures des espaces tampons.....</i>	<i>75</i>
<i>Parois de contact entre espaces tampons et volume protégé.....</i>	<i>75</i>
LES PLANCHERS.....	76
COMPOSITION DES PLANCHERS.....	76
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL.....	77
LES CHOIX CONCEPTUELS	78
<i>Choix de la zone 3 : zone de structure.....</i>	<i>78</i>
<i>Choix de la zone 1 : zone de revêtement de sol (aire de marche).....</i>	<i>78</i>
<i>Choix de la zone 2 : zone d'isolation.....</i>	<i>78</i>
<i>Choix des zones 4+5 : zones d'équipements et de finition intérieure.....</i>	<i>78</i>
LES FAÇADES VERTICALES.....	79
LA COMPOSITION D'UNE FAÇADE VERTICALE.....	79
<i>Zone 1 : zone de la peau extérieure.....</i>	<i>79</i>
<i>Zones 2 et 3 : zone de l'isolation thermique et zone de la structure.....</i>	<i>79</i>
<i>Zones 4 et 5 : zone d'équipements et zone de finition intérieure.....</i>	<i>79</i>
LES TYPOLOGIES DES FAÇADES VERTICALES ET LES CHOIX CONCEPTUELS.....	80
LES CHOIX CONCEPTUELS	81
LES BAIES ET LES ÉLÉMENTS TRANSLUCIDES	83
ORGANIGRAMME CONCEPTUEL.....	83
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL AU COURS DES ÉTAPES DE PROJET.....	84
LES CHOIX CONCEPTUELS	85
<i>Choix du positionnement dans la paroi opaque.....</i>	<i>85</i>
<i>Choix du type de châssis.....</i>	<i>85</i>
<i>Choix du type de vitrage.....</i>	<i>85</i>
<i>Choix du type de protection solaire.....</i>	<i>85</i>
LES PROTECTIONS SOLAIRES.....	86
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL.....	86
LES CHOIX CONCEPTUELS	87
LES TOITURES INCLINÉES.....	88
ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL.....	88
LES CHOIX CONCEPTUELS	89
<i>Choix de la zone 1 : zone de couverture.....</i>	<i>89</i>
<i>Choix de la zone 3 : zone de structure.....</i>	<i>89</i>
<i>Choix de la zone 2 : zone d'isolation.....</i>	<i>89</i>
<i>Choix des zones 4+5 : zones d'équipements et de finition intérieure.....</i>	<i>89</i>
LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	90
CHOIX DE LA PEAU EXTÉRIEURE.....	90
CHOIX DE LA ZONE DE COUVERTURE ET DU SYSTÈME DE TOITURE.....	90
LES TOITURES PLATES.....	93
LES CHOIX CONCEPTUELS	93
BIBLIOGRAPHIE.....	95
ANNEXE 1 : APPROCHE QUANTITATIVE.....	97

ANNEXE 2 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES.....	98
RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE AUX SURFACES ET RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR	98
RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE	98
RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR.....	99
COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE U_w DES FENÊTRES	99
LES PARE-VAPEUR	101
LES PARE-PLUIE	101
DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX ISOLANTS	102
DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES AUTRES MATÉRIAUX.....	104
ANNEXE 3 : GLOSSAIRE	105
TABLE DES MATIERES	109

La conception de l'enveloppe et de l'énergie

Tout en étant accessible à tous, ce Guide pratique pour architectes « L'isolation thermique des murs » est destiné plus particulièrement aux concepteurs, et poursuit l'objectif de les aider à faire les choix les plus adaptés aux projets de bâtiments qu'ils développent, et cela dès les phases préliminaires de leur conception.

À l'heure où les réglementations thermiques deviennent de plus en plus contraignantes, il présente diverses techniques constructives pour les parois opaques et vitrées de l'enveloppe, et des outils permettant d'atteindre les objectifs visés.

Il détaille les fonctions assurées par les zones qui composent les parois, et leurs matériaux spécifiques participant à leur comportement hygrothermique, y compris les nœuds constructifs.

Il rappelle les notions fondamentales de physique du bâtiment à l'aide de définitions, descriptions et tableaux faciles à comprendre, et par une mise en application dans un exemple concret, illustré de nombreux détails techniques.

En plus des aspects liés à la performance thermique, ce guide aborde également l'étanchéité à l'air, à l'eau, la diffusion de vapeur d'eau..., notions tout aussi essentielles pour garantir une construction durable.

Dans leur carrière professionnelle, Jean-Marie Hauglustaine et Francy Simon fusionnent les facettes de l'architecte auteur de projet, du chercheur scientifique et du professeur de techniques de construction conduisant à une excellente performance énergétique et environnementale des bâtiments, tant nouveaux que rénovés.

Jean-Marie Hauglustaine est aujourd'hui chargé de cours au Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, en Faculté des Sciences de l'Université de Liège. Son équipe de recherche EnergySuD développe des outils livresques (guides pratiques) et informatiques pour aider les concepteurs à intégrer le souci énergétique et environnemental dans le processus de conception de leurs projets. Elle est également impliquée dans l'accompagnement scientifique de la transposition, en Wallonie, des Directives PEB.

Francy Simon est professeur émérite de l'Université Catholique de Louvain, et continue à appliquer les principes qu'il a enseignés, dans ses projets d'architecture.